

VISIT...

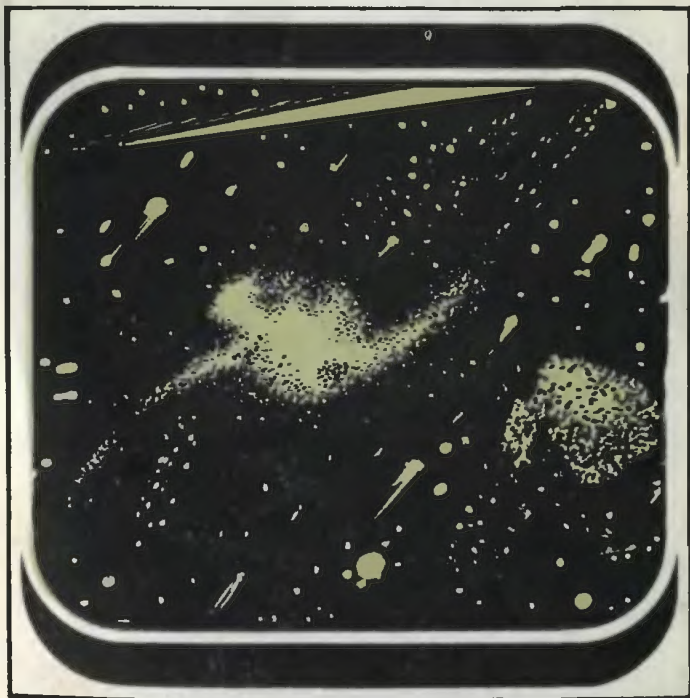
LANZAROTE
Caliente.COM

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание” ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати”.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов” в разделе „Центральные журналы”, рубрика „Брошюры издательства „Знание”.

Цена подписки на год 1 р. 32 к.



СЕРИЯ
ФИЗИКА

ФИЗИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1986/3

И.Д. Новиков
ЭНЕРГЕТИКА
ЧЕРНЫХ ДЫР



ЗНАНИЕ

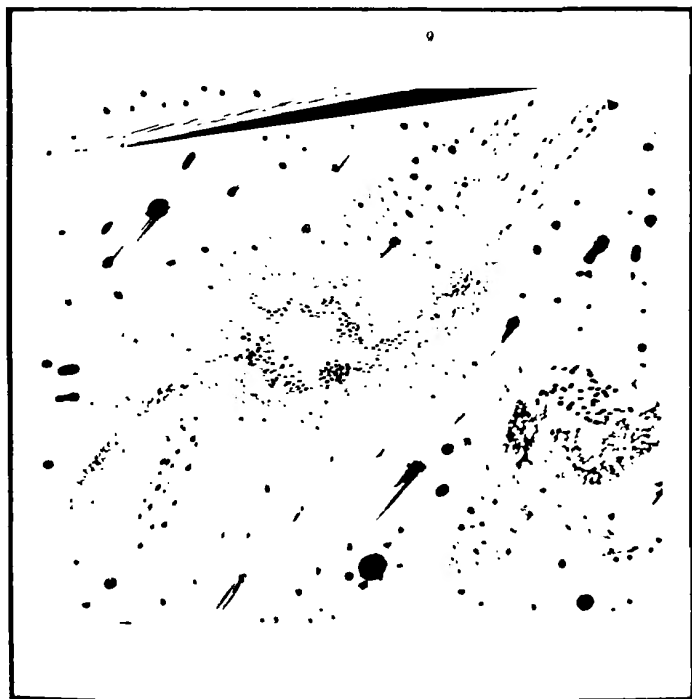
НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание“.

Цена подписки на год 1 р. 32 к.



СЕРИЯ

ФИЗИКА

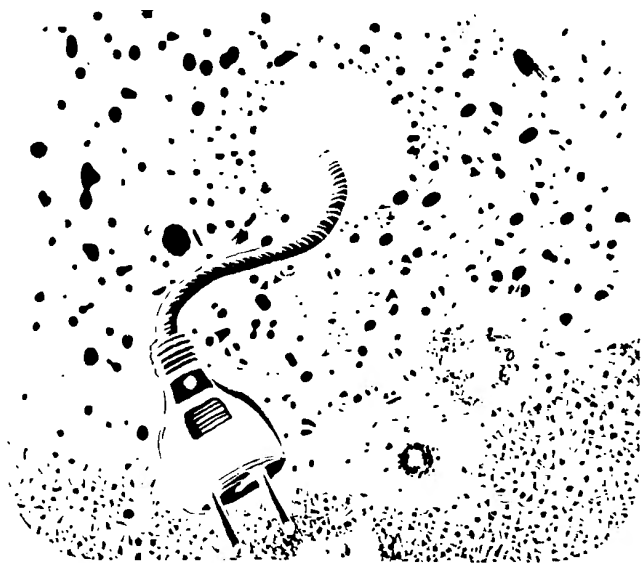
ФИЗИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1986/3

И.Д. НОВИКОВ
ЭНЕРГЕТИКА
ЧЕРНЫХ ДЫР



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

ФИЗИКА

3/1986

Издается ежемесячно с 1967 г.

И. Д. Новиков

ЭНЕРГЕТИКА ЧЕРНЫХ ДЫР



Издательство «Знание» Москва 1986

НОВИКОВ Игорь Дмитриевич — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий сектором Института космических исследований.

Рецензент: **Филиппов А. Т.**, доктор физико-математических наук,

Новиков И. Д.

Н 73 Энергетика черных дыр. — М.: Знание, 1986. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 3).

11 к.

В брошюре рассказывается о черных дырах, возникающих при очень сильном сжатии вещества, как об источниках огромной гравитационной энергии. Эта энергия запасена в них в виде обычного гравитационного поля большой напряженности и в виде своеобразного гравитационного вихря. Энергия черных дыр может отбираться от них в разных процессах, протекающих в естественных условиях во Вселенной и, возможно, в далеком будущем — в условиях, создаваемых искусственно. В частности, черные дыры могут работать как своеобразные электрические машины, квантовые генераторы, источники гравитационных волн.

Брошюра предназначен: для широкого круга читателей, интересующихся современными проблемами физики.

1705040000

ББК 22.63
524

ВВЕДЕНИЕ

Черные дыры со всеми их чудесами стали уже привычными гостями на страницах не только научной, но и научно-популярной литературы. Много раз эта тема обсуждалась и в брошюрах издательства «Знание» (см. список литературы). Мы тем не менее вновь обращаемся к проблеме, связанной с черными дырами. Причин для этого несколько. Во-первых, мы будем здесь говорить об энергетике черных дыр. Этот вопрос до сих пор далеко не достаточно освещен в популярной литературе.

Во-вторых, в науке о черных дырах, в особенности в разделах, связанных с выделением энергии при участии черных дыр, в последнее время получены новые существенные результаты.

Наконец, в-третьих, вопросам энергетики вообще и, в частности, энергетики для будущего развития человечества уделяется сейчас особое внимание. Не исключено, что черные дыры сыграют существенную роль в будущей истории человеческого общества.

Сегодня астрономы считают практически доказанным их существование во Вселенной (см. Новиков И. Д. Черные дыры во Вселенной, Знание, 1977).

Мы не будем подробно останавливаться на всех аспектах проблемы черных дыр. Как уже сказано, многое описано в имеющейся научно-популярной литературе. Мы только кратко напомним те свойства физики черных дыр и те сведения из общей теории относительности Эйнштейна, которые важны для обсуждаемых вопросов.

Черная дыра как энергетическая машина — этот аспект проблемы давно изучается физиками и астрономами.

В настоящее время есть веские основания считать, что не только мощные источники рентгеновского излучения в двойных звездных системах связаны с черными

дырамн, возникшими там после смерти массивных звезд, но и что сверхмощные источники энергии в ядрах галактик и квазарах так же связаны с процессами вокруг сверхмассивных черных дыр. А ведь эти последние источники энергии, излучающие 10^{47} эрг/с и более, являются самыми мощными в современной Вселенной. Недаром астрофизики иногда называют черные дыры «центральный мотором» квазаров и взрывающихся галактических ядер.

Мы постараемся показать, что многие аспекты энергетики черных дыр не менее удивительны, чем такие свойства этих загадочных объектов, как особая топология пространства и времени, наличие физических сингулярностей и т. д.

ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ ВОКРУГ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

В этом разделе мы коротко напомним читателю основные свойства поля тяготения, пространства и времени вокруг черной дыры. Черная дыра возникает, когда какая-либо масса сжимается настолько сильно, что усиливающееся гравитационное поле не выпускает во внешнее пространство никаких частиц и даже свет. Быстрее света ничто в пространстве двигаться не может. Поэтому из черной дыры не выходит никакая информация. Для того чтобы при сжатии тела массы M возникла черная дыра, необходимо, чтобы оно сжалось до размеров так называемого гравитационного радиуса

$$r_{\text{д}} = \frac{2GM}{c^2},$$

где G — постоянная тяготения Ньютона и c — скорость света в вакууме.

В ходе образования черной дыры гравитационное поле может быть сильно переменным, происходит излучение гравитационных волн. Однако очень быстро (за время порядка $\tau \approx r_{\text{д}}/c$) эти процессы замирают, гравитационные волны уносятся частично в бесконечность, частично в возникшую черную дыру. Вокруг черной дыры остается стационарное гравитационное поле, которое полностью характеризуется всего тремя параметрами: массой M тела, из которого возникла черная дыра, его угловым моментом j и полным электрическим зарядом Q (если тело было заряженным). Тот факт, что поле

тяготения черной дыры полностью определяется всего тремя числами, чрезвычайно важен. В этом отношении черные дыры коренным образом отличаются от обычных тел. Например, гравитационное поле Земли зависит не только от ее полной массы, но и от распределения вещества в земном шаре. Форма Земли очень сложна и несимметрична. Все это отражается на ее поле тяготения, которое тоже чрезвычайно сложно. Однако никаких несимметричных черных дыр быть не может! Всеякие отклонения от симметрии при образовании черной дыры уносятся гравитационными волнами.

В дальнейшем мы будем рассматривать главным образом незаряженные черные дыры. Для их описания достаточно двух параметров — M и j .

Конечно, гравитационное поле черной дыры вблизи ее границы очень сильное. Оно не может быть описано законом тяготения Ньютона и описывается теорией тяготения Эйнштейна.

Нас не будет интересовать, что происходит внутри черной дыры. В дальнейшем мы будем обсуждать лишь процессы во внешнем пространстве. Хорошо известно, что черная дыра не имеет материальной поверхности. Наблюдатель, падающий в черную дыру, при пересечении ее границы не встретит ничего, кроме пустого пространства. Эта граница определяется только тем условием, что из внутренней области из-за сильного тяготения не выходят наружу даже световые сигналы. Границу черной дыры называют горизонтом событий. Тем не менее, с точки зрения внешнего наблюдателя, все время остающегося снаружи черной дыры, она во многих отношениях похожа на компактное тело, ограниченное поверхностной мембраной с определенными механическими и электродинамическими свойствами. Принимается, что мембрана расположена как раз снаружи горизонта событий. Это, конечно, чисто условное представление. Однако оно очень наглядно и помогает работать нашей интуиции в условиях, когда силы тяготения огромны и многие представления необычны, даже без обращения к свойствам внутреннего пространства черной дыры. Такой подход называют «мембранным представлением» черной дыры. В последнее время он получил широкое распространение, особенно среди астрофизиков. Строгим его математическим обоснованием занимается американский физик Кип Торн и его коллеги.

помня все время об его ограниченности, о том, что черная дыра вовсе не тело с мембраной. Забвение этого факта может вести к серьезным ошибкам.

Итак, рассматриваем черную дыру как некоторое компактное «тело» во внешнем пространстве, в котором черная дыра создает поле тяготения.

Ниже мы остановимся на силах, которые, согласно теории Эйнштейна, действуют в этом пространстве, а также рассмотрим свойства этого пространства и течения в нем времени.

Начнем с простейшего случая, когда черная дыра возникает из невращающегося тела. Такая черная дыра носит название невращающейся или шварцшильдовской (по имени ученого, впервые описавшего ее гравитационное поле в 1916 г.).

Прежде всего геометрия внешнего пространства, как предсказывает теория Эйнштейна, оказывается не евклидовой, а подобной геометрии на искривленной поверхности (так называемой римановой геометрии). Это означает, что привычные геометрические соотношения не выполняются. Так, отношение длины окружности к радиусу не равно 2π , сумма углов треугольника не равна π и т. д. Отличия от евклидовой геометрии практически отсутствуют вдали от черной дыры, где поле тяготения слабо, но весьма заметны вблизи ее границы. В дальнейшем, когда мы будем говорить о расстоянии r какой-либо точки в пространстве от центра тяготения черной дыры, то будем иметь в виду не расстояние по радиусу от центра до данной точки, а длину окружности l , проведенной через эту точку вокруг черной дыры, деленную на 2π (напомним, что из-за неевклидовости геометрии это не одно и то же!). Такое определение связано с тем, что при мембранном представлении мы должны оставаться все время вне черной дыры и до ее центра добраться не можем, а значит, не можем и измерить расстояние от него.

Помимо неевклидовости геометрии внешнего пространства, оказывается, что в этом пространстве на разных расстояниях от черной дыры по-разному течет время. Согласно теории Эйнштейна время в сильном поле тяготения течет медленнее, чем в его отсутствие. Если обозначить через t время, текущее вдали от черной ды-

r от центра тяготения, будет $\tau = t \sqrt{1 - r_d/r}$. Вблизи границы черной дыры при $r \rightarrow r_d$ бег времени замирает.

Обратимся теперь к силам тяготения, действующим во внешнем пространстве.

По теории тяготения Ньютона сила, с которой сферическая масса M притягивает частицу с массой m , находящуюся на расстоянии r от ее центра, есть $F_N = GMm/r^2$, а ускорение свободного падения $a_N = GM/r^2$. Согласно теории Эйнштейна, сила тяготения, действующая на частицу, покоящуюся по отношению к тяготеющему центру (или движущуюся со скоростью малой по сравнению со скоростью света), и ускорение свободного падения выражаются соответственно формулами

$$F_g = \frac{GMm}{r^2 \sqrt{1 - r_d/r}}, \quad a_g = \frac{GM}{r^2 \sqrt{1 - r_d/r}}.$$

В теории Эйнштейна сила тяготения больше, чем в ньютоновской теории. С приближением к границе черной дыры сила тяготения стремится к бесконечности.

Указанные отличия теории Эйнштейна от теории Ньютона приводят к своеобразию движения частиц вокруг черной дыры и своеобразию распространения электромагнитных, гравитационных и других волновых полей. Прежде чем обращаться к этим особенностям, рассмотрим силы, которые действуют вокруг черной дыры, возникающей из вращающегося тела.

ВРАЩАЮЩАЯСЯ ЧЕРНАЯ ДЫРА

Прежде всего напомним, что согласно теории Эйнштейна поле тяготения вращающегося тела отличается от поля тяготения невращающегося тела той же массы. Поясним это отличие.

Невращающийся шар создает вокруг себя поле тяготения, аналогичное электрическому полю заряженной сферы (закон Кулона подобен закону Ньютона). Если вращать электрически заряженную сферу, то помимо электрического вокруг нее возникнет дипольное магнитное поле. Магнитное поле B не действует на покоящийся электрический заряд e . Однако если заряд движется со скоростью v , то на него начинает действовать лоренцева сила

$$F_A = [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \frac{e}{c},$$

отклоняющая заряд перпендикулярно направлению его движения.

Оказывается, в теории тяготения Эйнштейна имеется полная аналогия в этом отношении электромагнитному полю. Если тяготеющее тело завращать, то помимо сил притяжения, аналогичных кулоновским (и называемых поэтому гравиелектрическими), появляются гравитационные силы, действующие только на движущиеся массы, полностью аналогичные лоренцевым силам (и называемые гравимагнитными). Конечно, в сравнительно слабом поле тяготения обычных вращающихся тел гравимагнитные силы и вызываемые ими эффекты крайне малы. Так, напряженность гравимагнитного поля H на расстоянии r от шара радиуса r_1 массы M , вращающегося на экваторе со скоростью v_1 , составляет по порядку величины:

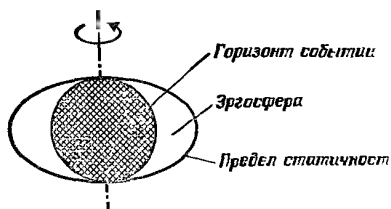
$$H \approx \frac{GMv_1r_1}{cr^3} \approx \frac{Gj}{cr^3},$$

где j — угловой момент тела. Вызываемое этим полем ускорение, действующее на частицу, летящую со скоростью v , есть: $a_{\text{л}} \approx vH/c$ (все скорости считаются малыми по сравнению со световой). Гравимагнитные силы проявляются прежде всего в том, что отклоняют падающие на тело частицы от радиального движения в сторону вращения тела. Этот эффект называют эффектом «увлечения».

Другим проявлением гравимагнитных сил является вызываемая ими прецессия (поворот) оси гироскопа по отношению к далеким звездам. Вблизи поверхности вращающейся Земли гироскоп должен прецессировать с угловой скоростью около $0,1''$ в год. В настоящее время имеется несколько проектов для экспериментального обнаружения этого эффекта.

Вернемся теперь к черной дыре, возникающей при сжатии вращающегося тела. После возникновения черной дыры во внешнем пространстве остаются помимо гравиелектрических еще и гравимагнитные силы. Поэтому такая черная дыра называется вращающейся (или Керровской, по имени ученого, который в 1963 г. описал ее гравитационное поле). Вращение черной дыры

Рис. 1. Вращающаяся черная дыра



характеризуют ее гравимагнитным полем H или угловым моментом j , который связан с H уже приведенным выше соотношением $H \approx Gj/cr^3$. Вращение черной дыры не может быть сколь угодно большим. Иначе центробежные силы помешали бы сжимающемуся телу достичь размеров гравитационного радиуса и превратиться в черную дыру. Максимально возможное вращение черной дыры массой M характеризуется угловым моментом $j = GM^2/c$. По мере приближения к вращающейся черной дыре и гравиелектрические и гравимагнитные силы возрастают. Если какое-либо тело покоится относительно далеких звезд, то гравитационная сила, действующая на него, на некотором расстоянии r становится бесконечной. Подчеркнем, что в отличие от невращающейся черной дыры здесь силы становятся бесконечными еще до достижения ее границы! Бесконечной в этом месте становится и угловая скорость прецессии гироскопа. Поверхность, которая на некотором расстоянии окружает вращающуюся черную дыру и на которой силы становятся бесконечными, называют пределом статичности. Она изображена на рис. 1. Ближе предела статичности уже никакое тело не может находиться в покое относительно далеких звезд. Все тела в этой области неудержимо увлекаются во вращение вокруг черной дыры в ту же сторону, что и вращается она сама. Однако предел статичности еще не есть граница черной дыры. Частица может и влететь в него и вылететь наружу. При этом она лишь обязана двигаться в сторону вращения черной дыры. Границей же черной дыры, как мы помним, называют границу области, откуда нельзя вылететь! Эта граница расположена внутри предела статичности (см. рис. 1). Область между границей черной дыры и пределом статичности называют эргосферой. Размеры эргосферы зависят от скорости вращения черной дыры. В отсутствие вращения эргосферы нет вообще.

Длина экватора предела статичности всегда равна $2\pi r_d$, а размер горизонта событий при наличии вращения несколько меньше. При максимальном вращении длина его экватора πr_d . Напомним, что $r_d = 2GM/c^2$.

Итак, в эргосфере никакие тела не могут находиться в покое, они обязаны вращаться вокруг черной дыры. Помимо всего прочего, это обстоятельство создает трудности с измерением гравитационных сил, измерением напряженности электромагнитных и других физических полей вблизи черной дыры. Действительно, значения напряженностей полей зависят от движения наблюдателей. В эргосфере любые наблюдатели движутся, покой невозможен. Спрашивается, каких же наблюдателей выбрать в качестве основных (фундаментальных, как говорят физики), аналогов неподвижных наблюдателей в случае невращающейся черной дыры? Условились выбрать во всем пространстве в качестве фундаментальных следующих наблюдателей. Во-первых, они находятся на неизменных расстояниях от черной дыры и от оси ее вращения. Во-вторых, они вращаются вокруг оси вращения черной дыры, каждый с неизменной угловой скоростью, разной на разных расстояниях от черной дыры.

Угловая скорость фундаментальных наблюдателей выбирается следующим образом. Если в черную дыру будут падать частицы, покоящиеся вначале вдали от черной дыры (на бесконечности), то, падая, они будут увлекаться во вращение вокруг дыры. Угловую скорость наблюдателей выбирают равной угловой скорости такой падающей частицы, которая проходит мимо наблюдателей. Естественно, что эта угловая скорость возрастает при приближении к черной дыре. Оказывается, все наши падающие частицы пересекают горизонт событий с одинаковой угловой скоростью, ее и называют угловой скоростью вращения черной дыры. В специальной литературе наших фундаментальных наблюдателей иногда называют «невращающимися». Мы не будем здесь разбирать, почему возникло такое название.

Условились, что когда говорят о напряженности каких-либо полей вокруг вращающейся черной дыры, имеют в виду напряженности, измеряемые фундаментальными наблюдателями.

Теперь мы достаточно вооружены некоторыми сведениями о черных дырах, чтобы приступить к рассмотрению их как возможных энергетических машин.

КАК ИЗГОТОВИТЬ ЧЕРНУЮ ДЫРУ

Прежде всего несколько слов о том, как можно создать черную дыру.

На первый взгляд, задача эта несложная. Надо взять какую-либо массу M и сжать ее до размеров гравитационного радиуса $r_d = 2GM/c^2$. Это, конечно, верно. Однако, дело чрезвычайно осложнено тем, что величина гравитационного радиуса ничтожно мала, даже для больших масс (r_d пропорционален массе). Так, если взять массу небольшой горы, то ее пришлось бы сжать до размера атомного ядра! Разумеется, не может быть и речи об искусственном создании черных дыр в современных лабораториях или в лабораториях обозримого будущего.

Даже если бы мы взяли массу Земли ($6 \cdot 10^{27}$ г), то ее пришлось бы сжать до размеров 1 см, а массу Солнца ($2 \cdot 10^{33}$ г) — до размеров 3 км.

Но оказывается, природа сама позаботилась о возможности возникновения черных дыр, правда, достаточно большой массы. Такие черные дыры могут возникать в конце жизни достаточно массивных звезд.

Мы не будем здесь сколь-нибудь подробно говорить об эволюции звезд и о том, что их ждет в конце жизненного пути. Читатель опять же может узнать об этом из книг, приведенных в списке литературы. Для нас достаточно будет сказать, что если звезда в самом конце активной эволюции, уже после исчерпания ядерного горючего, имеет массу, скажем, в десять масс Солнца и более, то весьма вероятно, силы собственного тяготения сжимают ее до размеров гравитационного радиуса и превращают в черную дыру. Более того, первые черные дыры во Вселенной, возникшие из звезд, вероятно, уже открыты астрономией. О методах их поисков и открытий мы несколько подробнее скажем далее в связи с одним из способов выделения энергии с помощью черной дыры. Наконец, весьма вероятно, как мы уже говорили, что сверхмассивные черные дыры с массой от 10^4 до 10^8 масс Солнца и более возникают в центрах галактических ядер. Возможно также, что во Вселенной есть черные дыры и другой природы.

Таким образом, в будущем в первую очередь, вероятно, будут использоваться черные дыры естественного происхождения. Мы в дальнейшем изложении не станем

останавливаться на многих технических деталях, сосредоточив внимание на принципиальных вопросах.

ПРОСТЕЙШАЯ МАШИНА

Для наглядности представим себе полуфантастическую картину. Черная дыра, скажем с массой с 10 масс Солнца и радиусом около 30 км, окружена искусственной сферой на достаточно большом расстоянии (~ 10 млн. км), где поле тяготения уже слабо, с тем чтобы на поверхности этой сферы ускорение силы тяжести было невелико и могла существовать цивилизация.

Самый простой способ использования гигантского поля тяготения черной дыры заключается в следующем.

Будем опускать в черную дыру какой-либо груз массой m , закрепленный на прочном канате. Считаем для простоты, что канат имеет пренебрежимо малую массу. Второй конец каната намотан на вал маховика. Груз, опускаясь к черной дыре, будет раскручивать маховик. Энергию маховика можно использовать для работы динамомашины или аккумулировать любым другим способом (растягивая пружины и т. д.).

Пусть для простоты черная дыра не вращается. Тогда при медленном опускании груза m до радиуса r выделится энергия, равная

$$\Delta E = mc^2(1 - \sqrt{1 - r_d/r}).$$

Если мы опустим груз вплотную к горизонту событий $r \approx r_d$, то выделится энергия $\Delta E \approx mc^2$. Таким образом, при этом будет выделена практически вся внутренняя энергия груза, которая по формуле Эйнштейна и есть mc^2 ! Стопроцентное извлечение энергии из массы m ! Никакие термоядерные источники энергии не могут сравниться с подобной машиной! Так, при превращении водорода в гелий в будущих управляемых термоядерных реакциях выделяемая энергия не превышает одного процента от mc^2 .

Если сравнивать нашу машину с более привычными источниками энергии, то можно сказать, что при опускании 1 г груза выделяется столько же энергии, сколько дает падение 100 млн. т воды с плотины высотой 100 м. Заметим теперь следующее. Если мы медленно опускаем груз почти к самой дыре, то сила тяготения, действующая на груз, стремится к бесконечности. Груз будет тя-

нута за прикрепленный к нему конец каната с неограниченно возрастающей силой и, как бы ни был прочен канат, в конце концов оборвет его и упадет в черную дыру.

Весьма любопытно, что сила, необходимая для удержания груза от падения, которая прикладывается к другому концу каната на нашей искусственной сфере вдали от черной дыры, вовсе не стремится к бесконечности даже на последних этапах опускания. Она равна $F = \frac{GMm}{r_d^2}$ т. е. такая же, как и в теории Ньютона. Тот факт, что силы, действующие в покое на разные концы каната, разные (одна из них даже бесконечная, а вторая конечная), связан с фактом замедления времени в поле тяготения и с замиранием его бега на горизонте (с точки зрения далекого наблюдателя).

Но груз, опущенный к горизонту событий, необходимо оборвет канат и упадет в черную дыру.

Подчеркнем, что весь наш процесс не изменяет энергии черной дыры. Масса черной дыры (а значит, и ее энергия) не меняется при этом вовсе, несмотря на то, что груз в нее упал. Дело в том, что вся внутренняя энергия груза, а значит, и его масса переданы на сферу и используются цивилизацией в виде электроэнергии или другом виде. Гравитационное поле черной дыры служило тут своеобразным катализатором для стопроцентного использования внутренней энергии опускаемого груза.

Заметим в заключение, чтобы избежать недоразумений, что если бы тело просто упало в черную дыру, не будучи закреплено канатом, то масса черной дыры, конечно, увеличилась на величину, привнесенную падающим телом. При этом, однако, мы никак не используем ту кинетическую энергию, которую приобретает падающее тело. Эта энергия оказывается погребенной в черной дыре. Правда, при таком падении некоторая энергия все же уносится в виде гравитационных волн, но об этом мы поговорим в следующем разделе.

ГРАВИТАЦИОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Способ использования черной дыры для получения энергии, описанный в предыдущем разделе, требует определенных сооружений вокруг черной дыры. В данном

разделе мы опишем способ, не требующий никаких сооружений в ее окрестности.

Идея этого способа чрезвычайно проста. Надо бросать в черную дыру тела (что можно делать с очень больших расстояний). Эти тела, подлетая к черной дыре и испытывая большие ускорения, будут излучать гравитационные волны, несущие энергию.

Энергия гравитационных волн в принципе может улавливаться специальными антеннами.

Прежде всего скажем несколько слов о гравитационных волнах. Эти волны предсказываются общей теорией относительности Эйнштейна. Они представляют собой переменное гравитационное поле, оторвавшееся от источника и распространяющееся в пространстве со скоростью света. В этом отношении они похожи на электромагнитные волны. Гравитационные волны проявляются следующим образом. Если перпендикулярно направлению распространения волны расположить две массы на некотором расстоянии друг от друга, то при прохождении синусоидальной гравитационной волны расстояние между массами будет периодически меняться. Сразу же оговоримся, что изменения эти совершенно ничтожны даже в случае гравитационных волн, возникающих при космических катастрофах, таких, например, как взрыв сверхновой звезды. Прямым способом гравитационные волны до сих пор не зарегистрированы.

Две массы, описанные нами, являются простейшей гравитационной антенной. Если связать их пружиной, то колебания в натяжении пружины можно использовать в принципе для переработки энергии волн в другие виды.

Существуют иные, гораздо более сложные конструкции гравитационных антенн, но их описание не является нашей задачей.

Гравитационные волны, как уже сказано, излучаются при ускоренном движении масс. При этом излучающая система теряет энергию. Даже при движении небесных тел эти потери ничтожны. Так, движение планет в Солнечной системе вызывает излучение гравитационных волн мощностью всего 10^{11} эрг/с, что в 10^{22} раз меньше, чем излучение световой энергии Солнцем. Вернемся теперь к черным дырам. Вблизи них мощное гравитационное поле заставляет падающие тела испытывать очень большие ускорения. Соответственно мощным бу-

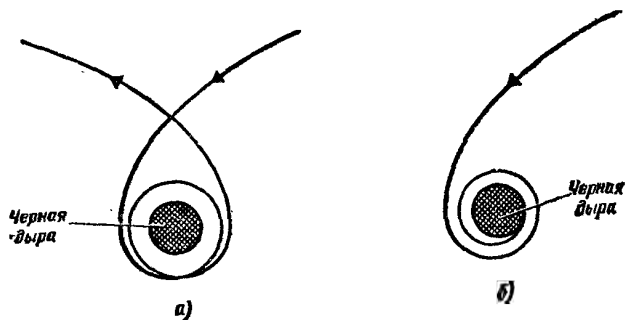


Рис. 2. Траектории тел вокруг черной дыры:
 а) после нескольких оборотов тело улетает от черной дыры;
 б) захват тела черной дырой

дёт и возникающее гравитационное излучение. Прежде чем подробнее рассказать о том, как именно будут излучать падающие частицы, нам надо познакомиться с некоторыми особенностями движения тел и волновых полей в окрестности черной дыры.

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ ВОКРУГ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

Тела, движущиеся вдали от черной дыры, подчиняются законам небесной механики Ньютона и движутся либо по эллипсам, либо по параболам, либо по гиперболам. Вблизи же черной дыры их движение совсем не похоже на предсказания ньютоновской теории (рис. 2).

Пусть скорость брошенного тела вдали от черной дыры много меньше скорости света. Если траектория такого тела подходит к невращающейся дыре на расстояние, почти равное $2r_{\text{д}}$, то оно совершит вокруг нее много оборотов, прежде чем вновь улетит в пространство. Если же тело подлетит к черной дыре на расстояние, меньшее $2r_{\text{д}}$, то, совершив вокруг нее несколько оборотов, оно упадет в черную дыру. Это явление называют гравитационным захватом.

Вокруг черной дыры возможны движения и по круговым орбитам. Однако имеется весьма существенная оговорка. Эти круговые орбиты не могут быть расположены достаточно близко к черной дыре!

Если радиус круговой орбиты меньше $3r_d$, то движение становится неустойчивым. Малейший толчок — и тело либо упадет в черную дыру, либо улетит вдаль от такой орбиты. На орбите с радиусом $r = 3r_d$ тело движется со скоростью, равной половине световой. Чем ближе к черной дыре, тем большая требуется скорость, чтобы уравновесить силы тяготения.

На расстоянии $r = 1,5r_d$ от черной дыры лежит круговая орбита, по которой возможно движение лишь со скоростью света. Разумеется, это движение неустойчиво.

Еще ближе к черной дыре нет даже неустойчивых круговых орбит.

Если траектория светового луча подойдет к черной дыре на расстояние $1,5r_d$, то она будет неограниченно навиваться на эту окружность, а при еще меньшем расстоянии луч света будет захвачен и упадет в черную дыру.

Движение тел вокруг вращающейся черной дыры имеет свои особенности.

Так, тела, летящие вблизи черной дыры в сторону, противоположную ее вращению, легче захватываются и падают в черную дыру. Тела, летящие вокруг нее в сторону ее вращения, захватываются с большим трудом, им для этого надо подлететь заметно ближе к черной дыре.

Все происходит так, как если бы гравимагнитное поле, существующее вокруг вращающейся черной дыры, действовало подобно праще, ускоряя и отбрасывая тем самым (т. е. препятствуя захвату) тела, движущиеся в ту же сторону, что и «вихрь» этого поля, и, наоборот, тормозя и захватывая тела, летящие в противоположную сторону. Изменяется ситуация и с круговыми орбитами. Как мы помним, для невращающейся черной дыры граница устойчивых круговых орбит лежит при $r = 3r_d$. В случае быстро вращающейся черной дыры эта граница лежит гораздо ближе к горизонту, глубоко внутри эргосферы, но здесь тела могут двигаться только в сторону вращения черной дыры. В то же время для тел, обращающихся вокруг черной дыры в противоположном направлении, граница устойчивости лежит при $r = 4,5r_d$.

Сделаем несколько замечаний о распространении волн, имеющих длину, сравнимую с размером черной дыры. В этом случае вблизи черной дыры весьма существенны явления дифракции и интерференции. Оказывается, существуют резонансные частоты волн. На таких

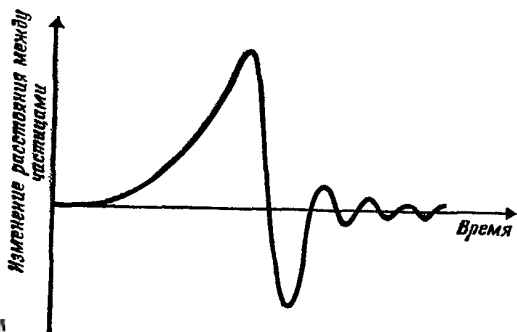


Рис. 8. Гравитационная волна при падении тела по радиусу в черную дыру

частотах волны, возбужденные вблизи черной дыры или пришедшие извне, как бы резонируют, сравнительно медленно затухая. Конкретные значения резонансных частот зависят от природы волн и несколько различны для разных волн. Но для нас эти тонкости не очень существенны, мы можем считать, что длина волн резонансного излучения всегда порядка размеров черной дыры.

Имеется аналогия (правда, отдаленная) между рассмотренным нами явлением и звоном колокола, звучащего на резонансных частотах. В силу этой аналогии резонансное излучение, возбужденное в окрестности черной дыры, называют ее «звоновым» излучением.

ИЗЛУЧЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПАДАЮЩИМИ ТЕЛАМИ

Вернемся теперь к проблеме излучения гравитационных волн телами, падающими в черную дыру.

Начнем с простейшего случая падения тела по радиусу в невращающуюся черную дыру. Как происходит излучение энергии? На рис. 3 показана форма излучаемой гравитационной волны. По вертикальной оси на графике отложено изменение относительного расстояния между частицами детектора, по горизонтальной оси — время. На рисунке ясно виден первый всплеск излучения. Это волна, приходящая прямо от тела, падающего в черную дыру. Вслед за этим первым всплеском виден цуг волн «звонового» излучения. Это резонансное излучение, следствие резонансного «дрожания» черной ды-

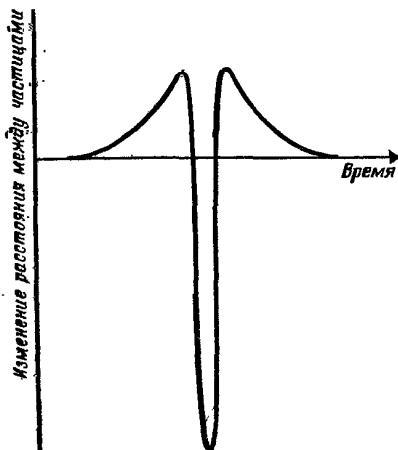


Рис. 4. Гравитационная волна от тела, огибающего черную дыру и улетающего от нее

ры, возбуждается телом на самых последних этапах падения в нее. Основная доля излученной энергии содержится именно в «звонном» излучении.

Сколько же излучается энергии при падении массы m ? Расчет показывает, что при таком падении успевает высветиться сравнительно немного энергии. Численно эта величина равна одному проценту от mc^2 , умноженному на отношение массы тела m к массе черной дыры M , m/M . Ясно, что если масса падающего тела много меньше массы черной дыры (а так оно, естественно, и должно быть), то и общее количество излученной энергии оказывается чрезвычайно малым.

А что будет, если тело падает в черную дыру не по прямой, а с некоторым прицельным параметром, по дуге? Естественно ожидать, что тело, дольше двигаясь вблизи черной дыры, больше излучит энергии. Расчет показывает, что это действительно так. Полное количество излученной энергии может быть раз в 100 больше, чем в случае движения по прямой, но по-прежнему остается все же небольшим из-за очень маленького в реальных условиях множителя m/M . Если же тело не падает в черную дыру, а пролетает на некотором расстоянии от нее, то количество излученной энергии уменьшается с увеличением минимального расстояния траектории от черной дыры. Это естественно, так как частица движется в области, где поле тяготения уже сравнительно сла-

бо. Пролетая на заметном расстоянии от черной дыры, тело не возбуждает уже «звонového» излучения, что ясно видно на рис. 4, где имеется только всплеск гравитационного излучения непосредственно от тела, огибающего черную дыру и улетающего в пространство.

Если черная дыра вращается, то общее количество излученной энергии может быть несколько больше, чем без вращения, но того же порядка и, в общем, мало.

Спрашивается: а нельзя ли увеличить количество излучаемой гравитационной энергии, заставляя тело двигаться вокруг черной дыры по круговой орбите? Ведь тогда тело будет долго кружить, излучая энергию. Эта идея правильна. По мере излучения энергии радиус круговой орбиты будет медленно уменьшаться. Вдали от черной дыры этот процесс идет очень медленно, так как мощность излучения мала. Но по мере уменьшения радиуса орбиты процесс убыстряется. Так продолжается до тех пор, пока тело достигает границы устойчивости круговых орбит — $r = 3r_g$ для невращающейся черной дыры. Еще несколько оборотов — и тело сваливается в черную дыру. Сколько при этом излучается энергии за все время вращения? Полная величина оказывается значительной — 6% от mc^2 . Такова энергия связи тела на границе устойчивых орбит. Это, конечно, не 100%, как в разобранным нами первом механизме, но все же заметно больше, чем при термоядерных реакциях!

Если черная дыра вращается, то полная энергия, излученная телом при кружении в сторону вращения черной дыры, составляет 42% от mc^2 , а при движении в противоположную сторону — около 4%.

Таким образом, полная энергия, излученная телом в виде гравитационных волн, может быть велика. С точки зрения энергетик, большой трудностью является улавливание этой энергии антеннами и преобразование ее в другие виды.

АККРЕЦИЯ ГАЗА ЧЕРНОЙ ДЫРОЙ

Нельзя ли у частицы, кружащей вокруг черной дыры, отбирать энергию не в виде трудно уловимых гравитационных волн, а каким-либо другим способом, который позволил бы легче использовать отводимую энергию? Такой способ есть. Более того, он, вероятно, реально осуществляется в природе.

Речь идет о движении частиц газа вокруг черной дыры. Если кружить вокруг черной дыры будут слои газа, то трение их друг от друга приведет к разогреву, выделению тепловой энергии, которая будет высвечиваться в окружающее пространство в виде электромагнитных волн.

Представим себе тесную двойную систему, одна из компонент которой является умершей звездой, превратившейся в черную дыру, а вторая компонента нормальная звезда-гигант с раздувшейся газовой оболочкой. Обе компоненты совершают орбитальное движение под действием взаимных сил тяготения. Газ из раздувающейся оболочки звезды-гиганта будет под действием тяготения течь к черной дыре. Перетекающий газ не может просто упасть в черную дыру. Из-за орбитального движения компонент двойной системы частицы газа имеют угловой момент относительно черной дыры. Поэтому, приближаясь к ней, слои газа будут закручиваться, образуя диск. Частички газа движутся при этом почти точно по круговым орбитам, наподобие маленьких планет. Однако имеется очень существенное отличие в движении газа от движения изолированных тел по круговым орбитам вокруг тяготеющего центра. Слои газа, движущиеся на разных расстояниях с разной угловой скоростью, испытывают трение. Это ведет к двум эффектам. Во-первых, газ нагревается, происходит переход кинетической энергии орбитального движения частиц в тепло, затем в излучаемую газом световую энергию. Во-вторых, из-за трения происходит постепенная перекачка углового момента от внутренних частей диска к наружным, где этот угловой момент вместе с небольшой частью газа, поступающего в диск, выбрасывается из системы.

Рассмотренные процессы ведут к тому, что слои газа в диске, постепенно теряя кинетическую энергию и момент, уменьшают радиусы своих орбит, приближаясь к черной дыре по очень пологой спирали. Если для изолированного тела на круговой орбите, рассмотренного в предыдущем параграфе, энергия и моменты отводились гравитационными волнами и процесс шел очень медленно, то здесь дело идет несравненно быстрее. Наконец, слои газа достигают последней устойчивой круговой орбиты вокруг черной дыры. Дальше уже орбитальное движение невозможно, и газ сваливается в черную дыру. У внутренней кромки диска газ должен разогреть-

ся, как показывают расчеты, до температуры десять миллионов градусов и даже больше. При этом он будет излучать рентгеновские лучи. Следовательно, черные дыры во Вселенной можно искать как рентгеновские источники в составе тесных двойных звездных систем. Именно так предлагали искать черные дыры в 1964 г. академик Я. Б. Зельдович и автор этой брошюры, а в 1965 г. — член-корреспондент АН СССР И. С. Шкловский.

В начале 70-х годов с помощью американского специализированного рентгеновского спутника были открыты многочисленные рентгеновские источники и среди них источник, получивший название Лебедь X-1. Дальнейшие исследования показали, что рентгеновское излучение этого источника, по-видимому, возникает в газовом диске вокруг черной дыры, входящей в двойную звездную систему. Звезда-гигант в этой системе имеет массу около 20 солнечных масс, а черная дыра массу около 10 масс Солнца. Эта система находится от нас на расстоянии около 6 тыс. световых лет. Мощность рентгеновского излучения около 10^{37} эрг/с, т. е. в несколько тысяч раз больше, чем полная мощность солнечного излучения. Газ, поступающий в диск из оболочки звезды-гиганта, тратит около месяца, чтобы по пологой спирали в диске приблизиться к внутреннему его краю и упасть в черную дыру. Это несравненно быстрее, чем в случае потери энергии телом путем гравитационного излучения. В наружных частях диска его температура несколько десятков тысяч градусов, а во внутренних частях радиусом 100—200 км, откуда идет основная энергия, температура достигает десятков миллионов градусов. Напомним, что радиус черной дыры с массой 10 масс Солнца составляет 30 км. В настоящее время известны и другие рентгеновские источники, которые, возможно, являются черными дырами.

Таким образом, вероятно, механизм дисковой аккреции газа на черную дыру реально работает во Вселенной. Какова эффективность этого механизма? Полное количество выделенной энергии массой газа m за все время движения в диске вплоть до достижения границы устойчивости, очевидно, равно энергии связи на этой границе. Это значит, что эффективность такая же, как и в случае гравитационного излучения при круговом движении, т. е. составляет 6% от mc^2 для невращающейся чер-

ной дыры и может достигать 42% в случае вращающейся дыры.

Но надо подчеркнуть, что при дисковой аккреции газа энергия выделяется в виде электромагнитного излучения, которое легко улавливать и преобразовывать. Таким образом, во Вселенной, по-видимому, есть готовые энергетические машины с черными дырами, которые можно использовать.

ЭНЕРГИЯ ВРАЩЕНИЯ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

Процессы, протекающие в окрестности черной дыры, которые мы до сих пор рассмотрели, предоставляют возможность для использования ее гигантской гравитационной энергии. Так, частица массой m , кружащаяся вокруг вращающейся черной дыры, излучает, как мы видели выше, гравитационные волны, уносящие около 40% полной энергии частицы $E = mc^2$. Однако сама частица (и часть гравитационных волн) в конце концов падает в черную дыру, увеличивая ее массу и размеры. Аналогично этому потоки газа в диске вокруг черной дыры выделяют столько же энергии в виде электромагнитных волн и также сваливаются в черную дыру.

Естественно, возникает вопрос, а нельзя ли придумать какие-либо процессы, сопровождающиеся уменьшением размеров черной дыры, и извлечь тем самым энергию, связанную не с объектом, движущимся вокруг черной дыры, а энергию самой черной дыры?

Прежде всего необходимо уточнить вопрос. Полная энергия черной дыры — это ее полная масса, умноженная на квадрат скорости света: $E = Mc^2$. В эту полную энергию (или массу) входит также и энергия вращения черной дыры. Таким образом, полная энергия (масса) черной дыры определяется как ее размерами (площадью ее границы — горизонта), так и ее вращением. Оказывается, полная масса M следующим образом может быть выражена через площадь горизонта S и угловой момент j черной дыры:

$$M = \sqrt{\frac{Sc^4}{16\pi G^2} + \frac{4\pi j^2}{Sc^2}}.$$

Если вращение отсутствует ($j = 0$), то полная масса M определяется только площадью горизонта. В общем же случае ($j \neq 0$) второе слагаемое в подкоренном вы-

ражении формулы описывает вклад вращательной энергии в массу черной дыры. Таким образом, размер черной дыры и ее масса (энергия) при наличии вращения неоднозначно определяют друг друга. Поэтому изменение массы (энергии) черной дыры еще не означает обязательно изменение ее размеров. Следовательно, наш вопрос необходимо разделить на два.

1) Существуют ли процессы, извлекающие энергию из черной дыры и уменьшающие ее массу?

2) Существуют ли процессы, уменьшающие размеры черной дыры?

(Мы говорим именно об уменьшении размеров, ибо для увеличения ее размеров достаточно бросить в черную дыру какое-либо тело.)

Начнем с первого вопроса.

Все, что мы узнали о черных дырах, заставляет предполагать отрицательный ответ на него. Действительно, мы знаем, что из черной дыры ничто не выходит, значит, из-под горизонта нельзя извлечь энергию. Это верно. Но мы упустили в этом рассуждении, что часть энергии (а значит, и массы) вращающейся черной дыры, связанная именно с вращением, находится, образно говоря, вне черной дыры и заключена в вихревой компоненте ее поля. Вот эту вращательную часть энергии и можно, оказывается, отнять от черной дыры, уменьшив ее массу.

Уменьшить вращение черной дыры относительно просто. Надо бросать во вращающуюся черную дыру тела с некоторым прицельным параметром, целясь так, чтобы они приближались к эргосфере, двигаясь в сторону, противоположную вращению дыры. Эти тела, захватываясь черной дырой, будут приносить в нее помимо своей массы еще и свой угловой момент. Мы прицеливались так, чтобы угловой момент тел был противоположен моменту черной дыры. Поэтому после захвата угловой момент дыры уменьшается. Однако при этом мы не извлекаем никакой энергии (за исключением сравнительно небольшой энергии гравитационного излучения падающих тел). Ведь энергия падающих частиц исчезает в бездне черной дыры. Ее масса и площадь поверхности горизонта при этом увеличиваются.

В 1969 г. английский физик Роджер Пенроуз указал процесс, который позволяет извлекать вращательную энергию черной дыры. Суть его состоит в следующем.

Пусть в эргосферу вращающейся черной дыры попа-

даст падающее тело. Оно движется там в сторону ее вращения. Вблизи горизонта событий тело распадается на два. Можно так устроить распад, чтобы одна часть тела, получив толчок против движения, упала в черную дыру, а вторая, получив дополнительный импульс и ускорившись, с огромной скоростью вылетела из эргосферы, как бы выброшенная «пращей» гравимагнитных вихревых сил. Оказывается, что огромная скорость, с которой тело вылетает из эргосферы, намного превышает ту скорость, с которой тело, падая, подлетало к эргосфере. Энергия вылетевшего тела колоссальна. Она не только намного больше небольших затрат энергии, затраченной на распад тела, но и гораздо больше полной энергии падающего тела, включая его энергию покоя mc^2 .

Откуда взялась столь большая энергия вылетевшего тела? Дело в том, что после распада вылетающее тело перешло на такую орбиту, где оно, подхваченное «гравитационным вихрем», было вышвырнуто из эргосферы. Значит, оно получило энергию от гравитационного вихря, т. е. от вращательной энергии черной дыры. Вращение черной дыры, ее угловой момент j при этом уменьшаются. Уменьшается и полная масса M черной дыры на величину, приобретенную улетевшим телом. Заметим, что площадь горизонта черной дыры при этом несколько увеличивается, так как часть тела, упавшая в черную дыру, принесла свою энергию.

Наибольшее количество вращательной энергии черной дыры тело может унести в том случае, когда распад происходит у самого горизонта. В этом случае размер горизонта не меняется (такие процессы получили название обратимых). Подобные процессы падения тел можно повторять многократно, и таким образом можно отнять у черной дыры всю вращательную энергию, не меняя ее собственного размера.

Нетрудно определить, сколько таким способом можно выкачать вращательной энергии из черной дыры.

Масса вращающейся черной дыры задается приведенной выше формулой. Когда отнята вся вращательная энергия, черная дыра уже не вращается ($j = 0$) и остается только первое слагаемое в подкоренном выражении этой формулы. При максимально возможном большом вращении черной дыры второе слагаемое равно первому. Отсюда легко получаем, что из такой черной дыры можно извлечь энергию: $E_{\text{вращ}} = (M_{\text{вращ}} - M_{\text{невращ}})c^2 =$

$= (1 - 1/\sqrt{2}) M_{\text{вращ}} c^2 = 29\% M_{\text{вращ}} c^2$, где $M_{\text{вращ}}$ — масса вращающейся черной дыры.

Заметим, что, как показал анализ реалистических естественных процессов вокруг черных дыр во Вселенной, их угловой момент должен быть очень близок к максимально возможному, составляя от него $0,998 j_{\text{max}}$. Подчеркнем, что процесс, предложенный Р. Пенроузом, возможен только при распаде тела в эргосфере.

Нетрудно теперь представить себе машину, которая работает, получая энергию от вращающейся черной дыры. Пусть на нашей искусственной сфере вокруг черной дыры имеется устройство, сбрасывающее тела с нужным прицельным параметром в черную дыру. На каждом теле имеется несложное автоматическое устройство, обеспечивающее маленький взрыв с разделением тела на две части у горизонта событий, как это описано выше. Вылетающие из эргосферы с большой скоростью тела улавливаются другим устройством, использующим их энергию для нужд цивилизации.

Так обстоит дело с ответом на первый вопрос, поставленный в начале этого раздела. На второй вопрос ответить было гораздо труднее. Но и он в настоящее время решен. Оказалось, что площадь горизонта черной дыры никогда не уменьшается ни в каких процессах до тех пор, пока мы не обращаемся к квантовым процессам, о чем еще будет речь впереди. Если же взаимодействуют друг с другом несколько черных дыр, то не уменьшается сумма площадей их горизонтов. Это один из законов физики черных дыр. Из него, например, следует, что ни при каких воздействиях черная дыра не может разделиться на две черные дыры. Если бы такое произошло, то при сохранении энергии сумма площадей горизонтов возникших черных дыр должна была бы быть меньше площади исходной черной дыры. (Мы не станем здесь останавливаться на доказательстве этого факта подробнее. Читатель, используя приведенные выше формулы, легко может проделать это самостоятельно.) Следовательно, как бы ни раздирали черную дыру приливные гравитационные силы, какими бы другими способами мы на нее ни воздействовали, «разодрать» ее на части нельзя.

Мы увидим в дальнейшем, как уточняется закон уменьшения площади горизонтов черных дыр, когда существенными становятся квантовые процессы.

ЧЕРНАЯ ДЫРА — ГЕНЕРАТОР ИЗЛУЧЕНИЯ

Что будет происходить, если черная дыра облучается какими-либо волнами? На первый взгляд, ответ прост. Волны, которые проходят очень близко от черной дыры, гравитационно захватываются ею и навсегда исчезают. Другие волны, идущие несколько дальше, искривляют свою траекторию и вновь уходят в пространство. Это процесс рассеяния волн черной дырой. При приближении волн к черной дыре их частота возрастает (этот эффект называют фиолетовым гравитационным смещением), но когда рассеянные волны вновь уходят вдаль от черной дыры, их частота уменьшается (красное гравитационное смещение). В итоге частота волн возвращается к первоначальному значению, которое было до приближения к дыре.

Итак, общая картина получается следующей: при облучении черной дыры часть электромагнитных волн попадает в нее, а часть рассеивается с той же частотой, которая была до рассеяния. Из-за того, что часть электромагнитных волн навсегда захватывается черной дырой, интенсивность рассеянных волн меньше, чем первоначальная интенсивность облучающего пучка.

Пока все выглядит тривиально. Но возможна, оказывается, ситуация, когда интенсивность рассеянных электромагнитных волн будет больше, чем облучающих. Для этого необходимо, чтобы была достаточно мала частота облучающих волн.

Пусть ω — частота волн, n — их орбитальный момент, $\Omega_{ч.д.}$ — частота вращения черной дыры. Тогда при выполнении условия

$$\omega < n\Omega_{ч.д.}$$

рассеянные электромагнитные волны будут более интенсивными, чем падающие. Этот процесс усиления был открыт в 1971 г. академиком Я. Б. Зельдовичем. Он получил название суперрадиации. Суперрадиация, по существу, аналогична ранее рассмотренному нами процессу увеличения энергии тела, выбрасываемого из эргосферы и отнимающего вращательную энергию черной дыры (при суперрадиации также отнимается вращательная энергия черной дыры). Следует отметить, что при облучении вращающейся дыры электромагнитными волнами усиление их не очень велико. Максимально возможное

усиление энергии¹ электромагнитной волны составляет всего 4,4%.

Явление суперрадиации проявляется при облучении черной дыры не только электромагнитными волнами, но и другими видами излучений. Так будут усиливаться, например, низкочастотные гравитационные волны, падающие на вращающуюся черную дыру. Причем условие возникновения суперрадиации для всех видов излучений одно и то же и определяется приведенным выше неравенством. Однако коэффициент усиления различный для разных видов излучений. Так, для гравитационных волн максимальное усиление 138%, т. е. гораздо больше, чем для электромагнитного излучения.

Попробуем теперь на основе рассмотренного процесса сконструировать генератор излучения, например генератор электромагнитного излучения.

Окружим вращающуюся черную дыру сферой, отражающей электромагнитные волны. Пусть внутри этой сферы имеется хотя бы ничтожное количество электромагнитных волн, для которых выполнено условие возникновения суперрадиации. Эти волны, падая на черную дыру, усиливаются и уходят вдаль от черной дыры. Здесь они встречают отражающую сферу, отражаются и снова устремляются к черной дыре, где вновь усиливаются. Процесс повторяется снова и снова, и энергия усиливающегося излучения будет лавинообразно нарастать.

Если в отражающей сфере сделать отверстие, то часть усиливающихся волн будет через него выходить наружу. И тем самым наша установка станет генератором электромагнитного излучения, в котором вращательная энергия черной дыры непосредственно трансформируется в электромагнитное излучение.

Подчеркнем, что заметно усиливаются только волны, имеющие длину, сравнимую с размером черной дыры.

Существует еще один способ непосредственного превращения энергии вращения черной дыры в излучение, на этот раз гравитационное.

Представим себе частицу, кружащую вокруг вращающейся черной дыры. Эта частица, как мы знаем, будет при движении излучать гравитационные волны в пространство. Оказывается, можно так подобрать параметры орбиты частицы, что из-за эффекта суперрадиа-

ции волн она будет при движении поглощать как раз столько энергии (источником которой является вращательная энергия черной дыры), сколько сама излучает в пространство. Орбита такой частицы уже не будет уменьшаться из-за гравитационного излучения (как это было выше рассмотрено), поскольку потери энергии здесь скомпенсированы ее поглощением. Такие орбиты называют «плавающими орбитами», так как они не опускаются в черную дыру, как бы плавают на воображаемой поверхности, не опускаясь вниз.

Описанная система непосредственно трансформирует вращательную энергию черной дыры в гравитационное излучение.

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И БОЛЬШЕ НИЧЕГО...

В предыдущих разделах мы познакомились с несколькими способами использования черных дыр в качестве источников энергии. Мы теперь знаем, как можно извлекать вращательную энергию черной дыры, знаем, что невозможно уменьшить размер черной дыры. Казалось бы, если черная дыра не вращается (т. е. не обладает вращательной энергией), то нельзя и извлечь из нее энергию. Однако это не так: из-под горизонта энергии извлечь нельзя, но черная дыра окружена мощным гравитационным полем, и можно, оказывается, использовать энергию этого поля.

Наиболее чистым экспериментом с выделением энергии, в котором присутствуют только поля тяготения невращающихся черных дыр, является следующий. Представим себе две невращающиеся черные дыры, первоначально находящиеся далеко друг от друга, но движущиеся по прямой навстречу. Вдали от таких черных дыр поля тяготения слабы и подчиняются теории Ньютона. Поэтому две черные дыры, когда они далеки друг от друга, движутся в пространстве подобно двум обычным звездам. Однако постепенно их скорость под действием взаимного тяготения должна увеличиваться, и после достаточного сближения стремительное ускоренное движение черных дыр навстречу друг другу начнет сопровождаться мощным излучением гравитационных волн. Это излучение и есть тот процесс, который помогает извлечь энергию из поля тяготения черных дыр.

Сблизившись, черные дыры сливаются в одну чер-

ную дыру (в отличие от деления черной дыры на две процесс слияния возможен!). Масса образовавшейся новой черной дыры будет при этом меньше суммы масс слившихся черных дыр. (Это есть прямое следствие того, что часть энергии унесена гравитационными волнами и новая черная дыра обладает меньшей энергией, а значит, и массой, ибо $E = Mc^2$.) В таком процессе гравитационные волны смогут унести некоторую долю суммарной массы сливающихся черных дыр.

Сейчас этот процесс полностью промоделирован на электронной вычислительной машине. Оказалось, что если сталкиваются «лоб в лоб» две черные дыры, каждая массой M , падающие друг на друга с большого расстояния, то в виде гравитационных волн излучается несколько меньше одного процента от Mc^2 .

В приведенном выше случае до столкновения и после него отсутствует что-либо, кроме невращающихся черных дыр, их гравитационных полей и гравитационных волн, излученных в результате столкновения. Эти волны в принципе могут быть уловлены гравитационными антеннами, и их энергия может быть трансформирована в другие виды энергии. Следовательно, можно извлекать энергию и из невращающихся черных дыр, а говоря более точно, из окружающих их гравитационных полей.

Рассмотрим теперь случай, когда сталкиваются две черные дыры, причем еще вдали друг от друга их скорость сближения была очень большой, очень близкой к скорости света. Прежде всего заметим, что гравитационное поле каждой из таких быстро летящих дыр будет весьма своеобразным. Вспомним известное явление лоренцевского сокращения длины быстро летящих тел. Как предсказала специальная теория относительности, тело, летящее со скоростью v , короче (в направлении движения) такого же покоящегося тела в $\sqrt{1-v^2/c^2}$ раз. Точно такое же лоренцевское сокращение длины испытывают не только тела, но и физические поля. Черная дыра и ее поле тяготения «сплющиваются», с точки зрения наблюдателя, мимо которого они движутся с большой скоростью. Поле тяготения каждой из двух черных дыр, быстро летящих навстречу друг другу, будет сильно сплюснуто в направлении движения. Перед быстро летящей черной дырой и позади нее практически нет гравитационного поля. Это поле отлично от нуля толь-

ко в плоскости, перпендикулярной движению, причем здесь оно имеет свойства гравитационной волны. Быстро летящие навстречу друг другу черные дыры «не чувствуют» взаимного приближения, так как впереди каждой из них практически нет гравитационного поля. Только подлетев совсем близко друг к другу, они испытывают резкое ускорение и излучают гравитационные волны. В этом случае, как показали численные расчеты на компьютере, эффективность превращения их энергии в гравитационное излучение может быть очень большой и достигать 20—30%.

В заключение этого раздела подчеркнем, что после слияния двух черных дыр площадь горизонта возникшей новой черной дыры оказывается больше суммы площадей горизонтов двух черных дыр до их слияния. Таким образом, и здесь соблюдается важнейшее правило: сумма площадей горизонтов черных дыр никогда не уменьшается.

ВЗАИМОПРЕВРАЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

В этом разделе мы опишем любопытное явление, которое может происходить в окрестности заряженной черной дыры. Выше мы подчеркивали, что в естественных условиях во Вселенной черная дыра вряд ли может иметь заметный электрический заряд. Действительно, если предположить, что электрически заряженная черная дыра все же образовалась, например из заряженного тела, то очень быстро произойдет следующее. В космическом пространстве всегда есть свободные электрически заряженные частицы. Заряженная черная дыра будет притягивать частицы противоположного знака заряда по сравнению с ней самой и отталкивать частицы, знак заряда которых совпадает со знаком ее заряда. В результате к заряженной черной дыре устремятся частицы с зарядом противоположного знака и, упав в нее, быстро ее нейтрализуют. Тем не менее можно себе представить искусственно созданные условия, при которых заряженная дыра может длительно существовать. Для этого, например, надо ее оградить от возможности захвата заряженных частиц. Представим себе, что такие условия созданы. Что представляет собой заряженная черная дыра с зарядом Q ? Если она не вращается, то

ее свойства вполне аналогичны свойствам шварцшильдовской черной дыры, только помимо гравитационного поля тяготения она обладает еще и электрическим полем. Силовые линии этого поля радиальны, а его напряженность определяется законом Кулона:

$$E = Q/r^2.$$

Если же заряженная черная дыра вращается, то помимо поля тяготения, аналогичного полю керовской вращающейся черной дыры, и электрического поля вокруг нее возникает дипольное магнитное поле с магнитным моментом $\mu = (Q/M) j$. Дело обстоит точно так же как, если бы мы завращали электрически заряженную сферу. В этом случае вокруг нее также возникает магнитное поле.

Вернемся теперь к задаче о превращении волн. Пусть заряженная черная дыра облучается гравитационной волной. Эта волна, проходя вблизи черной дыры, вызывает дрожание силовых линий электрического поля. В результате возникает электромагнитное излучение! Таким образом, после рассеяния заряженной черной дырой гравитационной волны часть энергии волны переходит в электромагнитное излучение.

Возможно и противоположное явление. Если заряженная черная дыра облучается электромагнитной волной, то из-за взаимодействия ее с электрическим полем черной дыры рождается гравитационное излучение. Следует, однако, подчеркнуть, что обычно коэффициент преобразования одной волны в другую крайне мал. Но в специально подобранных условиях он может быть порядка единицы.

Впервые на возможность взаимного превращения электромагнитных и гравитационных волн при наличии постоянного электрического (или магнитного) поля указал советский физик М. Е. Герценштейн в 1961 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

Мы переходим теперь к рассказу о том, как черная дыра может работать в качестве электрической машины (электромотора, динамомашин и т. д.).

Прежде всего мы должны познакомиться с удивительными свойствами границы черной дыры, которая, с

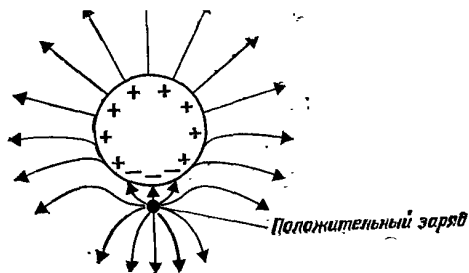


Рис. 5. Силовые линии электрического поля заряда вблизи черной дыры. Плюсами и минусами обозначены фиктивные поверхностные заряды на границе черной дыры

точки зрения внешнего наблюдателя, проявляется как «мембрана», наделенная определенными электрическими свойствами.

Чтобы понять, в чем здесь дело, рассмотрим электрическое поле заряда, расположенного вблизи невращающейся незаряженной черной дыры. Как мы уже говорили, трехмерное пространство в окрестности черной дыры искривлено, и поэтому силовые линии этого поля выглядят весьма необычно, как показано на рис. 5. Рисунок этот, разумеется, схематический, так как невозможно на плоском листке бумаги изобразить конфигурацию линий в искривленном пространстве. Мы видим, что часть силовых линий поля, искривляясь, уходит в пространство вдаль от черной дыры. Другие силовые линии упираются в черную дыру.

Если бы дело этим ограничивалось, то это означало бы, что черная дыра заряжена. Действительно, мы знаем, что закон Гаусса гласит: число силовых линий, пересекающих замкнутую поверхность, определяет полный заряд внутри нее. Но наша черная дыра в целом не заряжена; значит, если есть входящие в черную дыру силовые линии, то должны быть и линии, выходящие из нее. И в самом деле, мы видим на рисунке, что из черной дыры со стороны, противоположной заряду, выходят силовые линии электрического поля и уходят вдаль от черной дыры. Такая сложная конфигурация поля связана с сильной искривленностью пространства.

Силовые линии на рис. 5 выглядят так, как будто поверхность черной дыры является электрически проводящей сферой и приближение к ней извне заряда вызывает поляризацию свободных зарядов в электрически проводящей сфере. Заряды, имеющие противоположный

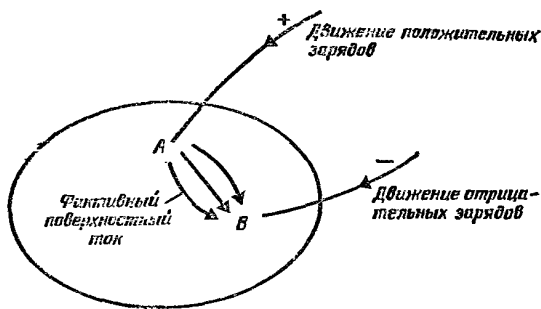


Рис. 6. Фиктивный поверхностный ток на границе черной дыры. Черная дыра сплюснута из-за вращения

знак по сравнению с приближаемым, притягиваются им и собираются с одной стороны сферы. Заряды того же знака, что и приближаемый, отталкиваются и собираются с противоположной стороны (см. рис. 5). Такая аналогия позволяет условно считать, что на поверхности черной дыры имеются (фиктивные) заряды, на которых заканчиваются силовые линии внешнего электрического поля.

Рассмотрим подробнее процесс приближения электрического заряда к черной дыре. В ходе приближения заряда будет меняться распределение фиктивного поверхностного заряда черной дыры — заряды противоположного знака стягиваются к точке, расположенной прямо под приближающимся зарядом. Значит, можно считать, что на поверхности черной дыры течет (фиктивный) ток! Далее, можно связать силу этого тока $I_{\text{ч.д.}}$ с напряженностью электрического поля $E_{\text{ч.д.}}$, которое действует вдоль поверхности черной дыры при приближении заряда, как это видит далекий наблюдатель:

$$I_{\text{ч.д.}} = R_{\text{ч.д.}} \cdot E_{\text{ч.д.}}$$

Это соотношение имеет вид хорошо знакомого закона Ома. Здесь мы обозначили через $R_{\text{ч.д.}}$ (фиктивное) поверхностное сопротивление черной дыры. Подробное рассмотрение показывает, что $R_{\text{ч.д.}} = 4\pi/c$, или в обычных единицах оно равно 377 Ом.

Итак, уже рассмотрение простейших электродинамических задач показывает, что поверхность черной дыры ведет себя как мембрана, наделенная определенными

электрическими свойствами. Рассмотрение более сложных задач подтверждает эту точку зрения. Например, пусть в разные части поверхности черной дыры падают два потока зарядов противоположного знака (рис. 6), так что полный заряд черной дыры не меняется. Тогда можно считать, что от места падения положительных зарядов А к месту падения отрицательных зарядов В течет поверхностный электрический ток, как показано на рис. 6.

Мы должны еще раз напомнить читателю, что в действительности никаких поверхностных зарядов и токов (как и самой материальной поверхности) у черной дыры нет. Если какой-то наблюдатель падает в черную дыру, то он не встречает при пересечении горизонта никакой материальной поверхности, никаких зарядов, никаких токов. Введение этих фиктивных величин является просто наглядным методом представления поведения силовых линий электрического (и как мы увидим, так же и магнитного) поля вблизи границы черной дыры, с точки зрения наблюдателя, расположенного вдали от черной дыры. Такое представление очень удобно, наглядно и позволяет работать нашей интуиции, привыкшей к анализу лабораторных экспериментов с проводящими сферами. Это позволяет нам, не обращаясь к сложным представлениям и расчетам, касающимся искривленного четырехмерного пространства-времени, с которым имеет дело общая теория относительности, сравнительно просто представить себе поведение черной дыры в тех или иных условиях.

В дальнейшем мы будем использовать описанное представление, не оговаривая каждый раз фиктивности понятий поверхностных зарядов и токов для черной дыры.

Обратимся теперь к рассмотрению того, как черная дыра может играть роль разных элементов электрической цепи и электрических машин. Это направление исследований сейчас активно разрабатывается американским физиком Кипом Торном и его коллегами. Разумеется, мы не будем останавливаться на технических деталях конструкций, а представим только общие схемы.

ЧЕРНАЯ ДЫРА КАК ЭЛЕМЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Рассмотрим следующую конструкцию (рис. 7). Пусть имеется генератор положительных и отрицательных зарядов (например, электронов и позитронов). Далее пусть с помощью специальной батареи, создающей напряжение V , заряды одного знака устремляются по проводнику к северному полюсу черной дыры, а заряды другого знака устремляются по другому проводнику к противоположному полюсу черной дыры*. Из дальнейшего станет ясно, почему здесь понадобился столь сложный источник электрического тока, а не обычная батарея с проводами. Будем считать, что внутреннее сопротивление батареи и проводников очень мало. Тогда согласно изложенным в предыдущем параграфе представлениям по поверхности черной дыры потечет ток. Сила тока зависит от напряжения батареи и сопротивления черной дыры. Сопротивление, создаваемое дырой, будет точно такое же, как у сферы с поверхностным сопротивлением 377 Ом, точно так же подключенной к проводникам. Если проводники, подходящие к полюсам, очень тонкие, то сопротивление сферы вблизи соединения велико и ток будет слабым. Но уже в том случае, если толщина проводника такова, что его границы упираются в сферу на расстоянии нескольких градусов от полюса, то полное сопротивление сферы будет около $R_{\text{полн}} = 300 + 400$ Ом.

Полный ток, текущий по поверхности черной дыры, будет равен $I = V/R_{\text{полн}}$ в полном соответствии с законом Ома. Этот ток течет по поверхности черной дыры вследствие того, что имеется напряженность электрического поля E . Вне поверхности на расстоянии r также имеется соответствующее электрическое поле, направленное вдоль меридианов и равное по величине $E \approx 2/r$. Оно может быть измерено наблюдателем. Такое поле было бы и в случае, если бы мы заменили черную дыру проводящей сферой, включенной в обычную электрическую цепь. Текущий по сфере ток I должен создавать вокруг магнитное поле, имеющее широтное направление, так же по порядку величины равное $B \approx 2I/r$. В слу-

* Мы не останавливаемся здесь на возможной конструкции проводников. См. об этом далее,

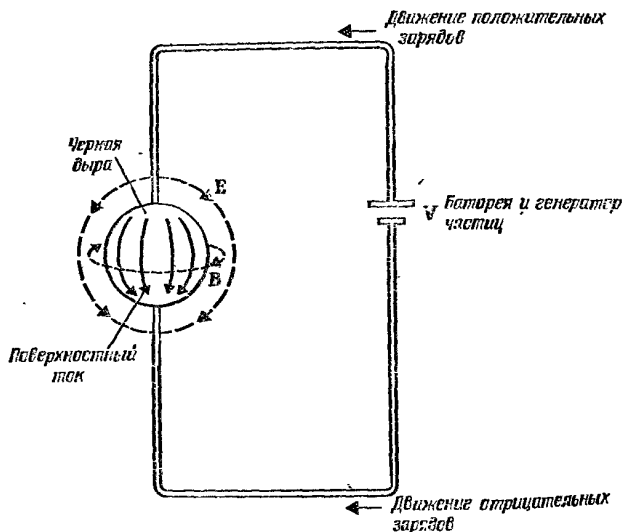


Рис. 7. Черная дыра как сопротивление в электрической цепи

чае черной дыры мы имеем то же самое. Причем магнитное поле также может быть измерено внешним наблюдателем.

Наконец, в случае сферы текущий ток будет выделять энергию (нагревая сферу). Потеря (омическая) энергии в единицу времени есть $P_{\text{омич}} = I^2 R_{\text{полн}}$. Точно так же в электрической цепи с черной дырой энергетические потери будут определяться той же формулой. Теряемая энергия будет идти на увеличение массы черной дыры.

Мы видим, что в данном случае, действительно, черная дыра ведет себя как проводящая сфера. Однако необходимо предупредить читателя, что аналогия эта, конечно же, не полна. В случае проводящей сферы мы могли подключить ее к обычной электрической батарее с помощью обычных проводов, и по ней потек бы ток. Если бы мы попытались сделать то же с черной дырой, то никакого электрического тока бы не возникло. Дело в том, что в обычных проводах носителями тока являются электроны, могущие передвигаться по проволоке. Они входят из провода в проводящую сферу на одном полюсе и выходят из нее в другой провод на противополо-

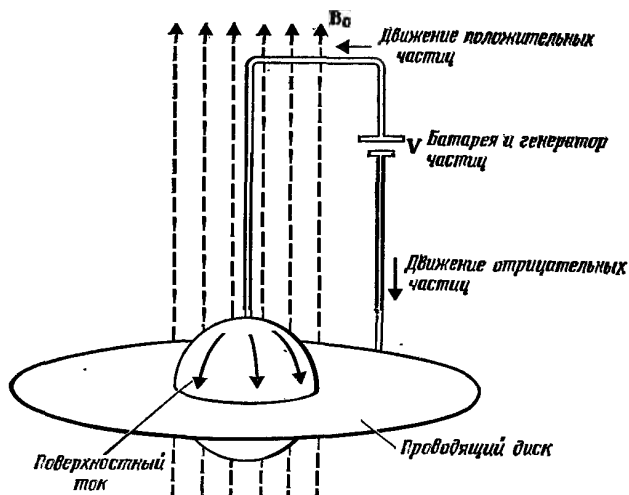


Рис. 8. Черная дыра как ротор электромотора

ложном полюсе. В случае черной дыры электроны могут в нее входить, но, конечно же, не могут из нее выходить. Поэтому, чтобы тек стационарный ток, необходимо, чтобы на противоположном полюсе в дыру падали заряды противоположного знака (скажем, позитроны). И электроны, и позитроны, падая в черную дыру, навсегда в ней исчезают. Вот почему в начале параграфа в качестве источника тока мы взяли не просто батарею, как это делается для обычной электрической цепи, а батарею и генератор заряженных частиц. Этот генератор все время поставляет частицы противоположных знаков, которые по проводникам стекают в черную дыру и навсегда там исчезают.

В дальнейшем, когда мы будем говорить, что черная дыра включена в электрическую цепь, всегда будем иметь в виду подобную конструкцию.

ЧЕРНАЯ ДЫРА КАК РОТОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОТОРА

На рис. 8 изображена конструкция, которая может раскручивать черную дыру за счет циркулирующего электрического тока. В этом смысле черная дыра будет

выступать здесь в качестве ротора электрического мотора.

Наша конструкция состоит из следующих элементов. К черной дыре проводниками подключена батарея (с генератором частиц), дающая напряжение V . Электрический ток подводится к черной дыре проводником с полюса и через проводящий диск у экватора. В этой электрической цепи течет электрический ток, входящий через северный полюс в черную дыру и текущий по ее северной полусфере к экватору, где через диск цепь замыкается к батарее.

Пусть теперь черная дыра погружена в магнитное поле, однородное вдали от нее и имеющее напряженность B_0 *. Элементы с током, текущим по поверхности черной дыры от северного полюса к экватору, испытывают в магнитном поле B_0 действие лоренцевой силы (действующей поперек тока и поперек магнитного поля), которая будет закручивать черную дыру. Черная дыра начнет вращаться! Таким образом, здесь черная дыра действительно выступает как ротор электромотора.

Мы уже знаем, что существуют разные способы забирать вращательную энергию черной дыры и трансформировать ее в другие виды.

В этом «чернодырном электромоторе» поверхностный ток не только закручивает черную дыру, сообщая ей вращательную энергию, но и вызывает омические потери, как это описано в предыдущем разделе. Здесь опять полная аналогия с обычным электромотором, обмотки которого нагреваются проходящим током.

В каком темпе возрастает вращательная энергия черной дыры? Здесь справедливы соотношения, полностью аналогичные обычному электромотору. Окончательное соотношение для нашего случая такое

$$P_{\text{вращ.}} = \frac{1}{2} \Omega_{\text{ч.д.}} I R_0 r_{\text{д}}^2,$$

где $\Omega_{\text{ч.д.}}$ — угловая скорость вращения черной дыры радиуса $r_{\text{д}}$.

Таким образом, в данной машине полные затраты

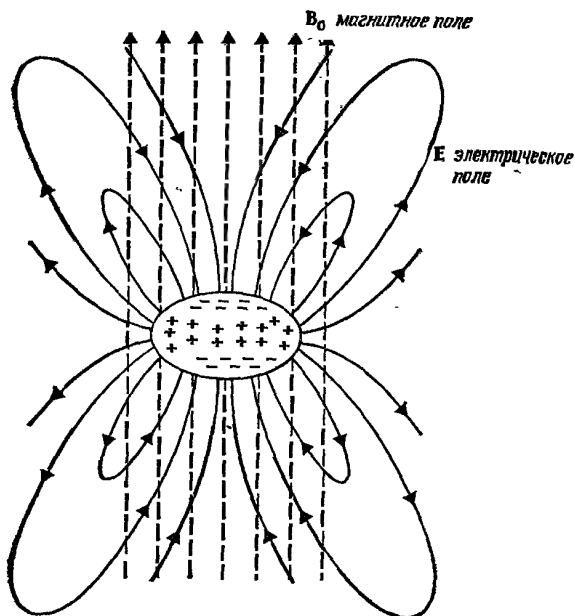
* Силовые линии магнитного поля вблизи черной дыры, конечно, искривлены, так как «искривлено» само пространство сильным полем тяготения. Но это сейчас не представляет для нас специального интереса.

энергии складываются из омических потерь $P_{\text{омич}} = \frac{I^2 R_{\text{полн}}}{2}$ (сопротивление здесь вдвое меньше, чем в предыдущем примере, так как ток течет только через верхнюю половину поверхности черной дыры) и из затрат на изменение вращательной энергии черной дыры $P_{\text{вращ}}$.

ВРАЩАЮЩАЯСЯ ЧЕРНАЯ ДЫРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Пусть имеется невращающаяся черная дыра, погруженная в магнитное поле. Начнем ее раскручивать. Для этого достаточно, как мы знаем, бросать в черную дыру тела с определенным прицельным параметром. Как будет происходить взаимодействие вращающейся черной дыры с магнитным полем? Чтобы разобраться в этом, вспомним взаимодействие проводящей вращающейся сферы с магнитным полем. Движение проводника поперек силовых линий магнитного поля вызывает появление в нем электрического поля. Под действием этого поля произойдет разделение зарядов в проводнике. Они переместятся так, чтобы связанное с ними электрическое поле нейтрализовало индукционное поле в проводнике. Теперь вспомним, что поверхность черной дыры аналогична проводящей сфере. У вращающейся черной дыры произойдет разделение поверхностных зарядов (подобно их разделению при поднесении к черной дыре электрического заряда). В целом эти заряды будут расположены так, как показано на рис. 9. У полюсов собраны заряды одного знака, у экватора — другого. Полный заряд черной дыры остается, конечно, равным нулю. Разделившиеся заряды создают вокруг сферы электрическое поле, имеющее квадрупольный характер. Если внешнее магнитное поле параллельно оси вращения черной дыры, то после разделения поверхностных зарядов никакие токи не текут по поверхности черной дыры, не происходит диссипации энергии, угловой момент черной дыры не меняется.

Ситуация изменится, если магнитное поле пересекает вращающуюся черную дыру под некоторым углом. В этом случае разделившиеся поверхностные электрические заряды перемещаются по вращающейся поверхности дыры, т. е. возникает поверхностный ток. Взаимо-



Ряс. 9. Быстровращающаяся черная дыра в магнитном поле индуцирует вокруг себя электрическое поле

действие тока с внешним магнитным полем будет вести к тому, что компонента углового момента черной дыры, перпендикулярная полю, будет уменьшаться, а компонента, параллельная магнитному полю, останется неизменной. В конце концов ось вращения черной дыры станет параллельной магнитному полю. Подчеркнем, однако, что изменения во вращении черной дыры происходят крайне медленно. Так, в условиях реальной Вселенной при массе черной дыры в 10 масс Солнца и обычных для космического пространства напряженностях магнитного поля 10^{-5} Тс выравнивание положения оси черной дыры вдоль направления магнитного поля произошло бы за 10^{35} лет! Напомним, что время, прошедшее с начала расширения Вселенной, составляет «все-го» 10^{10} лет.

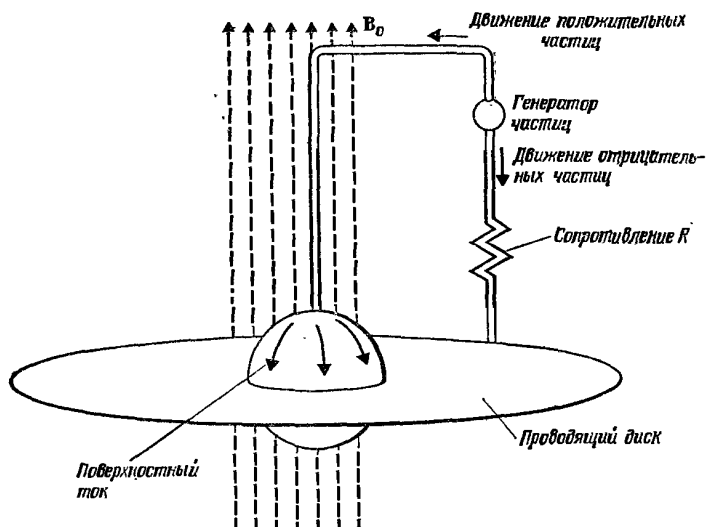


Рис. 10. Быстровращающаяся черная дыра в магнитном поле как униполярный индуктор

ЧЕРНАЯ ДЫРА КАК ИСТОЧНИК ТОКА

Вернемся к черной дыре, быстро вращающейся в магнитном поле, с осью вращения, параллельной направлению поля. Мы видели, что она несет разделенные поверхностные заряды, но какой-либо электрический ток при этом отсутствует. Давайте теперь включим черную дыру в электрическую цепь (рис. 10), как мы это делали выше в разделе об электромоторе, только электрическую батарею заменим обычным сопротивлением (генератор зарядов при этом оставим). Тогда по электрической цепи должен течь электрический ток. Действительно, наша установка во всем аналогична униполярному индуктору, в котором вращается проводящая сфера в магнитном поле.

Таким образом, черная дыра стала работать источником тока. Каковы свойства этого источника?

Выше мы уже говорили о поверхностном сопротивлении черной дыры. При подключении ее в цепь способом, подобным изображенному на рис. 10, ее полное сопротивление будет порядка 100 Ом.

Наиболее эффективно источник тока работает, если сопротивление внешней цепи равно внутреннему сопротивлению источника. В следующем разделе мы увидим, как наша схематическая машина может реально осуществляться в природе, вероятно в виде сверхмассивных черных дыр в центрах галактик. В этих условиях, оказывается, быстровращающаяся черная дыра массой в сто миллионов масс Солнца, пронизываемая полем в 10 тыс. Гс, дает напряжение $V \approx 10^{20}$ В. При этом в цепи течет электрический ток, равный напряжению источника, деленному на сумму сопротивлений источника и внешней цепи. В нашем примере его сила равна $I \approx 10^{18}$ А. Во внешнем сопротивлении выделяется энергия. В рассматриваемом случае мощность выделения энергии составляет около 10^{45} эрг/с. Для сравнения напомним, что мощность выделения световой энергии нашим Солнцем (его светимость) равна $4 \cdot 10^{33}$ эрг/с.

СВЕРХМАССИВНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В ЦЕНТРАХ ГАЛАКТИК

Описанные в предыдущих разделах электрические цепи с участием черных дыр могут показаться читателю в лучшем случае абстрактными теоретическими игрушками, годными разве лишь на то, чтобы продемонстрировать некоторые необычные принципы электродинамики черных дыр. В известной степени читатель прав. Мы сознательно максимально упрощали схемы механизмов и рассуждали так, как будто мы уже можем свободно экспериментировать с черными дырами чуть ли не в лаборатории.

Однако все сказанное в этих разделах в принципе действительно может быть осуществлено и, вероятно, будет осуществляться в будущем (но, конечно, в гораздо более сложном виде).

Самое же важное заключается в том, что некоторые из описанных механизмов, вероятно, уже существуют во Вселенной! Природа сама позаботилась о создании гигантских электрических машин с участием черных дыр.

Прежде всего давайте познакомимся с тем, как могут возникать сверхмассивные черные дыры с массой в миллион масс Солнца и более и какие есть наблюдательные свидетельства их действительного существования.

Выше мы говорили о возникновении черных дыр «звездного происхождения». Они возникали в результате смерти обычных массивных звезд. Но, если мы проанализируем эволюционные процессы в других небесных телах и системах небесных тел, то придем к выводу, что черные дыры могут быть и другой, незвездной природы. В первую очередь это относится к объектам, которые можно условно назвать сверхмассивными звездами.

Обычные звезды имеют массу до 60 масс Солнца. Звезды большей массы (скажем, 200, но меньше 1000 масс Солнца) не могут существовать длительно. Это связано с тем, что при наличии ядерного источника энергии в центре такой достаточно массивной звезды в ней возникают колебания, раскачивающие звезду и, вероятно, приводящие либо к сбросу вещества, либо к разрушению всей звезды.

Однако сверхмассивные звезды с массами в 1000 и больше масс Солнца, вероятно, могут существовать. В их равновесии существенную роль играют вращение и вызываемые им центробежные силы. Мы не будем здесь подробно останавливаться на этом вопросе. Для нас сейчас важно только одно — эти сверхмассивные звезды, теряя энергию на излучение, рано или поздно также должны потерять устойчивость, коллапсировать и превратиться в сверхмассивные черные дыры.

Образование таких сверхмассивных звезд может происходить, вероятно, лишь в тех местах, где имеются условия для скопления больших масс достаточно плотного газа. Такими удобными местами, видимо, являются центральные области больших звездных систем — галактик, возможно, центры шаровых звездных скоплений, а также квазары — ядра очень больших галактик.

Что происходит в центрах галактик и в центре нашей Галактики, в частности, исследовать очень трудно, так как эти области обычно закрыты облаками газа и пыли. Тем не менее бурные процессы в ядрах галактик показывают, что там протекают необычные явления.

Помимо газа в центрах рассматриваемых звездных систем могут быть очень компактные звездные скопления. Эволюция такого скопления приводит к тому, что скопление сжимается все сильнее и сильнее. Часто происходят столкновения звезд. В конце концов скопление

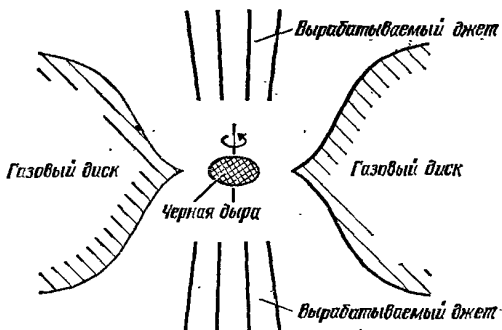


Рис. 11. Дискковая аккреция газа на сверхмассивную черную дыру

звезд должно сколлапсировать подобно огромной звезде и породить сверхмассивную черную дыру.

Подобные же процессы должны, вероятно, происходить и в квазарах. Квазары — это объекты, находящиеся далеко за пределами Галактики. Их светимость превосходит светимость больших галактик в сотни раз. В то же время они крайне малы по размерам (излучение возникает в области, имеющей размеры меньше одного светового года). Так что и в квазарах может находиться гигантская черная дыра с массой в сотни миллионов масс Солнца.

Падение газа в поле тяготения сверхмассивных черных дыр, находящихся в ядре галактики и в квазарах, играет важнейшую роль в различных наблюдаемых явлениях. Газ, который падает в сверхмассивную черную дыру в ядре галактики, может поступать из звезд, движущихся в ее окрестности. Эти звезды могут также разрушаться мощными приливными силами, и их вещество тоже будет падать в такую черную дыру.

В квазарах и ядрах галактик, являющихся источником мощного радиоизлучения, часто наблюдаются длинные тонкие прямолинейные выбросы, дающие радиоизлучение. Они получили название джетов. Иногда эти выбросы тянутся от центрального источника на десятки миллионов световых лет, не меняя своего направления в пространстве. Это означает, что джеты выбрасываются центральным источником в течение по крайней мере 10 млн. лет строго в одном направлении. По современным представлениям, процессы в окрестности черных

дыр могут объяснить совокупность наблюдательных данных. Быстровращающаяся сверхмассивная черная дыра, обладая огромной массой и малыми размерами, является прекрасным гироскопом, не меняющим направления оси вращения. Газ, стекающий к черной дыре, вдали от нее может двигаться в разных направлениях. Но вблизи черной дыры совместное действие гравимагнитных сил и трения струй газа приводят к тому, что вокруг нее образуется газовый диск, плоскость которого совпадает с экваториальной плоскостью вращающейся черной дыры (рис. 11). Движение газа в этом диске подобно тому движению, которое мы описывали, разбирая свойства черных дыр в двойных звездных системах. Вблизи черной дыры газовый диск, вероятно, достаточно толстый, и его внутренний край образует жерло, расширяющееся кнаружи вдоль оси вращения черной дыры. Джеты могут выбрасываться из этих жерл. Так как ось вращения черной дыры неизменна в пространстве, неизменным будет направление выброса джетов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ В ЦЕНТРАХ ГАЛАКТИК

Мы сейчас покажем, что вращающиеся черные дыры в центрах галактик при наличии газовых дисков действуют как гигантские электрические машины (рис. 12).

Газ в диске обычно пронизан магнитным полем. Поток газа увлекают за собой магнитное поле и усиливают его. Вблизи внутренних краев диска напряженность магнитного поля может достигать десятков тысяч гаусс. С последних устойчивых круговых орбит газ падает в черную дыру, увлекая за собой магнитное поле. Если бы не было вокруг замагниченного диска, то магнитное поле падающего в дыру газа превратилось бы в электромагнитные волны и улетело бы в окружающее пространство. Но давление окружающего магнитного поля газового диска удерживает магнитные силовые линии, пронизывающие черную дыру, от разлета. Конечная поверхностная проводимость горизонта черной дыры приводит к тому, что магнитные силовые линии могут скользить по горизонту, и в результате первоначально хаотическое магнитное поле газа, упавшего в черную дыру, становится упорядоченным, таким, чтобы текущие по горизонту поверхностные токи имели наи-

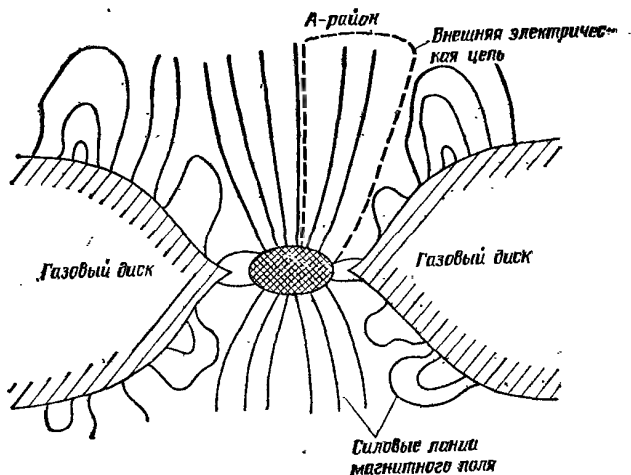


Рис. 12. Электрическая машина в центре галактики

меньшие омические потери. Вокруг черной дыры в жерле диска имеется разреженная плазма.

Разберем теперь, как действует эта электрическая машина.

Черная дыра вращается в магнитном поле. Мы уже знаем, что в этом случае она может служить источником тока. Для этого нужна только внешняя электрическая цепь и постоянный генератор электрических зарядов, которые могут двигаться в электрической цепи. Все это имеется в данном случае.

Вблизи черной дыры магнитное поле столь сильное, что заряженные частицы могут двигаться только вдоль магнитных силовых линий. Следовательно, эти линии действуют наподобие проводников, вдоль которых течет ток.

Вдали от черной дыры магнитное поле уже достаточно слабо и электрический ток может течь поперек магнитных силовых линий. (А-район на рис. 12). Одна из петель внешней электрической цепи изображена пунктиром на рис. 12. В А-районе энергия вращения черной дыры передается плазме. А-район является аналогом сопротивления R (см. рис. 10). Заряженные частицы противоположных знаков стекаются по магнитным силовым линиям к полюсам и экватору.

В А-районе все время происходит рождение новых заряженных частиц. Это может происходить следующим образом. Ускоренные до больших энергий частицы, сталкиваясь с фотонами теплового излучения, идущего от газового диска, передают им свою энергию. Возникающие энергичные кванты гамма-излучения в свою очередь сталкиваются с тепловыми фотонами. Происходит рождение электронно-позитронных пар. Так происходит работа генератора зарядов.

По-видимому, описанная нами машина действительно работает в центрах галактик. В предыдущем разделе мы уже говорили, что мощность подобной машины может достигать 10^{45} эрг/с. Примерно такая мощность как раз и требуется, чтобы объяснить наблюдаемые явления в ядрах активных галактик и квазарах.

ЧЕРНАЯ ДЫРА КАК ТЕПЛОВАЯ МАШИНА И КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ

Попытаемся теперь заставить черную дыру работать в качестве тепловой машины. Для работы всякой тепловой машины необходим перепад температур между нагревателем и холодильником. Если $T_{\text{нагр}}$ — температура нагревателя, $T_{\text{хол}}$ — температура холодильника, то согласно законам термодинамики коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины есть (формула Карно): $\text{КПД} = 1 - T_{\text{хол}}/T_{\text{нагр}}$. Чем меньше температура холодильника — тем больше КПД.

Казалось бы, черная дыра является идеальным холодильником. Она безвозвратно все поглощает и поэтому ничего не излучает. Значит, ее температура равна нулю, и КПД тепловой машины с черной дырой в качестве холодильника равен единице.

Американский физик Дж. Бекенштейн провел анализ работы такой тепловой машины. В простейшем виде она сводится к разновидности рассмотренной нами машины, опускающей груз в черную дыру (см. с. 12). Только теперь мы будем опускать на тросе в черную дыру не просто груз, а закрытый контейнер с излучением, имеющим температуру $T_{\text{нагр}}$. Подведя его к границе черной дыры, откроем крышку в дне контейнера, и все излучение уйдет в черную дыру. После этого поднимем контейнер к искусственной сфере. Опускаемый контейнер был тяжелее поднимаемого на величину мас-

сы излучения $m_{\text{изл}}$. Для подъема контейнера, следовательно, затрачено меньше энергии, чем получено при его опускании. Разность этих величин и есть полезная работа нашей машины за один цикл.

Мы знаем, что при опускании груза к самому горизонту выделяется вся его внутренняя энергия. Значит, если бы все тепло в виде излучения сбрасывалось из контейнера в черную дыру с уровня горизонта событий, то полезная работа равнялась бы всему количеству тепла и КПД машины был бы равен единице.

Но вот тут-то и проявляется квантовая природа излучения. Дело в том, что контейнер с излучением не может быть очень маленьким. Его размеры не могут быть меньше длины волны излучения, находящегося в нем. При температуре $T_{\text{нагр}}$ характерная длина волны излучения есть $\lambda \approx \hbar c / k T_{\text{нагр}}$. ($\hbar$ — постоянная Планка, k — постоянная Больцмана). Если дно контейнера опустить до горизонта, то верхняя крышка контейнера с излучением не дойдет до него по крайней мере на величину λ . А это значит, что доля λ / r_g излучения в контейнере не будет превращена в полезную работу.

Таким образом, КПД машины будет меньше единицы на величину λ / r_g , или, подставляя величину λ , на $\hbar c / k T_{\text{нагр}} r_g$. Сравнение этой величины с формулой Карно показывает, что в данном случае черная дыра ведет себя так, как будто ее температура $T_{\text{ч.д.}} \approx \hbar c / k r_g$, а вовсе не нуль! Что это такое — просто случайная аналогия с температурой, выступающая при анализе работы тепловой машины с черной дырой в качестве холодильника, или нечто гораздо более глубокое, связанное с квантовыми свойствами черной дыры?

В последующих разделах мы увидим, что полученное выражение для температуры $T_{\text{ч.д.}}$ имеет глубокий физический смысл и отражает одно из важнейших свойств черной дыры.

Для того чтобы с этим познакомиться, нам необходимо напомнить некоторые физические свойства вакуума.

КВАНТОВОЕ РОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ

До сих пор мы знакомились с такими процессами, которые либо используют вращательную энергию черных дыр (энергию гравимагнитного поля), либо энергию ее

внешнего гравитэлектрического поля. Никакие процессы не уменьшали размер горизонта событий черной дыры, не уменьшали ее, так сказать, внутреннюю энергию (ее иногда называют неприводимой массой). Сейчас мы обращаемся к квантовым процессам и в связи с этим к процессам, в которых активно участвует пустота — вакуум. Оказывается, рассмотрение этих процессов приводит к удивительным следствиям для черных дыр.

Согласно современным представлениям вакуум, т. е. пустота, в которой нет никаких реальных частиц, никаких реальных квантов физических полей, тем не менее не является абсолютной пустотой, «совершенным ничем». Он представляет собой «море» всевозможных так называемых виртуальных частиц и античастиц. Они не проявляются как реальные частицы. Но в вакууме все время происходит рождение на короткое время пар виртуальных частиц и античастиц, которые тут же уничтожаются. Они не могут превратиться в реальные частицы, так как это означало бы появление реальной энергии, которой взяться в пустоте неоткуда. И только на короткий миг соотношение неопределенностей квантовой физики позволяет появиться частицам. Это соотношение утверждает, что произведение времени жизни виртуальной пары частиц t на их энергию E порядка постоянной Планка $\hbar$, $Et \approx \hbar$. Реальные частицы всегда можно убрать из какого-то объема пространства. Но процессы с виртуальными частицами в принципе неустранимы. Таковы свойства пустоты. Если имеется какое-либо сильное поле, то под действием этого поля некоторые виртуальные частицы могут набрать достаточную энергию, чтобы стать реальными. Энергия при этом черпается из внешнего поля. Так в сильном поле может происходить рождение реальных частиц из вакуума за счет энергии этого поля.

Этот факт давно и хорошо известен. Что он дает в применении к проблеме черных дыр? В сильном электрическом поле заряженной черной дыры происходит рождение электронно-позитронных пар. Частицы противоположного знака заряда по сравнению с зарядом черной дыры притягиваются ею, падают в нее, уменьшая ее заряд. В 1970 г. М. А. Марков и В. П. Фролов и в 1980 г. И. Д. Новиков и А. А. Старобинский вычислили скорость, с которой происходит такая разрядка черной ды-

ры. Оказалось, что заряд черной дыры с массой в 10 масс Солнца быстро уменьшается еще в ходе ее образования и не может превышать 10^{35} зарядов электрона.

Другим квантовым процессом, важным для физики черных дыр, является рождение квантов поля в эргосфере вращающейся черной дыры. Вспомним, что при облучении вращающейся черной дыры волнами какого-либо поля для некоторых волн выполнялось условие усиления их амплитуды в эргосфере. Это явление суперрадиации. Аналогичный эффект может происходить и с виртуальными квантами. Те из виртуальных квантов, для которых выполняется условие усиления, могут превратиться в реальные кванты и вылететь из эргосферы. Рождение этих частиц происходит за счет гравимагнитного (вращательного) поля. Частота возникающего излучения порядка частоты вращения черной дыры. В результате вращательная энергия черной дыры постепенно переходит в излучение. В отличие от быстрого процесса электрической разрядки рассматриваемый процесс квантовой суперрадиации, исследованный в 1972 г. Я. Б. Зельдовичем и А. А. Старобинским, чрезвычайно медленен. Даже для максимально быстро вращающейся черной дыры с массой в 10 масс Солнца темп потери вращательной энергии составляет всего около 10^{-19} эрг/с. Это значит, что за все время существования Вселенной потеряно меньше одного эрга! В то же время полный запас вращательной энергии такой черной дыры около 10^{55} эрг. Разумеется, ни о каком практическом использовании столь ничтожного излучения от массивной черной дыры не может быть и речи. Однако мощность излучения обратно пропорциональна квадрату массы, и для маленьких черных дыр она может быть существенной. К этому вопросу мы еще вернемся.

Оба рассмотренных нами процесса вызываются полями вокруг черной дыры. Они приводят к изменению этих полей, но не уменьшают саму черную дыру, не уменьшают площадь горизонта событий.

КВАНТОВЫЙ ПОТОК ЭНЕРГИИ ИЗ ЧЕРНЫХ ДЫР

Оказывается, существует процесс, приводящий к превращению внутренней энергии (неприводимой массы) черной дыры в излучение. При этом уменьшается пло-

щадь поверхности черной дыры. Это открытие было сделано английским физиком С. Хоукингом в 1974 г. На первый взгляд эффект Хоукинга противоречит всему, что известно о черных дырах. Ведь мы неоднократно повторяли, что никакое излучение из черных дыр выйти не может, не может уменьшиться площадь поверхности черной дыры, и вдруг встречаемся с прямо противоположным утверждением.

Попытаемся хотя бы приближенно пояснить, в чем здесь дело. Весьма существенно, что рассматриваемый процесс имеет квантовый характер. Виртуальные частицы в вакууме из-за соотношения неопределенности рождаются на некотором расстоянии друг от друга. В случае поля тяготения черной дыры одна частица может родиться вне горизонта, другая под горизонтом. Та, что родилась вне горизонта, может улететь в пространство, другая же частица будет падать в черную дыру, никогда не уйдет к далекому наблюдателю. Вновь слиться и исчезнуть, как это случается с виртуальными частицами в вакууме вдали от черной дыры вне ее сильного поля тяготения, частицы уже не могут. Так возникает поток частиц от черной дыры в пространство. На этот раз расходуется энергия самой черной дыры, уменьшается размер горизонта событий. Еще раз подчеркнем, что это возможно из-за специфических особенностей квантовых процессов — соотношения неопределенности и др.

Хоукинг показал, что черная дыра излучает энергию так, как-будто ее поверхность нагрета до температуры $T_{\text{ч.д.}} = \hbar c / 4\pi k r_g$. Эта температура с точностью до численного множителя совпадает с тем. примерным значением, которое нашел Бекенштейн при разборе работы тепловой машины с черной дырой. Значит, найденная им температура черной дыры действительно имеет прямой физический смысл.

Следует сразу же подчеркнуть, что температуры черных дыр звездной массой совершенно ничтожны. Так для черной дыры в 10 масс Солнца $T = 10^{-8}$ К. В выражение для температуры гравитационный радиус входит в знаменателе, следовательно, для сверхмассивных черных дыр температура их и вовсе пренебрежима.

Квантовые потоки энергии от звездных и сверхмассивных черных дыр очень малы. Несколько позже мы приведем их численное значение.

Уходящие наружу кванты затрачивают работу про-

тив сил тяготения, и поэтому их энергия падает. Вблизи от черной дыры энергия квантов, а значит, и соответствующая температура существенно больше. Поэтому, если наблюдатель вдали от черной дыры видит, что ее излучение соответствует температуре $T_{\text{ч.д.}}$, то наблюдатель вблизи горизонта событий будет считать, что от горизонта идет излучение существенно большей температуры. Не все излучение, проходящее мимо наблюдателя вблизи горизонта, уходит в пространство. Большая его часть, имеющая хоть сколько-нибудь заметный угол распространения с направлением радиуса, очень сильно искривляется гигантским полем тяготения и снова уходит вниз к черной дыре. Только излучение, идущее почти точно по радиусу, способно уйти от черной дыры.

Здесь необходимо подчеркнуть, что сильное поле тяготения вблизи горизонта изменяет движение также и виртуальных частиц, как говорят, поляризует вакуум. Вклад в потоки энергии от виртуальных и реальных частиц оказывается нечетко разделенным, и вблизи горизонта нельзя строго отделить поляризацию вакуума от реальных частиц. Явление поляризации вакуума порождает столь странное состояние, которое характеризуется отрицательной плотностью энергии. Оказывается, что при положительном потоке реальных частиц, уходящих в пространство, существует поток отрицательной энергии внутрь черной дыры, обусловленной поляризацией вакуума. Этот поток и приводит к уменьшению массы черной дыры, к уменьшению ее размеров.

КВАНТОВЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

Чем меньше масса черной дыры, тем выше ее температура, тем быстрее идет процесс превращения ее массы в излучение. Мощность излучения определяется выражением $P = 10^{-20} \text{ эрг/с} \cdot (M/M_{\text{Солнца}})^{-2}$. Как уже было сказано, черные дыры звездной массы излучают ничтожно мало. В естественных условиях они поглощают гораздо больше энергии в виде падающего в них излучения или разреженного вещества. Но достаточно малая черная дыра может излучать энергию в заметном темпе, и к ней как к источнику энергии следует относиться серьезно. Так, черная дыра с массой 10^{15} г (масса небольшой горы) будет испускать 10^{17} эрг в секунду на протяжении 10 млрд. лет. Температура ее при этом около 10^{11} К . За-

метим, что это в 10 тыс. раз больше, чем температура в недрах Солнца. Размеры рассматриваемой черной дыры сверхмикроскопические, они порядка размеров атомного ядра.

Если чрезвычайно медленный процесс потери энергии черной дырой звездной массы на квантовое излучение называют «квантовым испарением», то излучение энергии маломассивными черными дырами испарением уже не назовешь, это вполне реальное свечение. В ходе такого свечения масса черной дыры уменьшается во всевозрастающем темпе. Когда масса черной дыры уменьшится до 1 млн. т, температура ее излучения достигает 10^{17} К. Процесс излучения превращается во взрыв. Последние тысячи тонн дыра взрывает за одну десятую долю секунды, превращая в 10^{30} эрг энергии, что соответствует взрыву 1 млн. мегатонных водородных бомб.

Таким образом, квантовое выделение энергии маломассивными дырами весьма эффективно. Но могут ли такие черные дыры возникать? Как мы уже подчеркивали в начале брошюры, искусственное их изготовление совершенно нереально, по крайней мере при современном уровне науки. А могут ли они возникнуть в природе? Мы в дальнейшем увидим, что ответ на этот вопрос положителен. Черные мини-дыры могли возникать в начале расширения Вселенной.

МОЖНО ЛИ БЫСТРО «ВЫЧЕРПАТЬ» ЭНЕРГИЮ ИЗ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

Итак, черные дыры сами теряют запасенную в них энергию без всяких внешних воздействий путем хоукинговского квантового излучения. Правда, как мы видели, для черных дыр звездного происхождения теряемая энергия ничтожна. Так, для невращающейся черной дыры с массой в 10 масс Солнца эффективная ее температура 10^{-8} К, а потеря энергии 10^{-22} эрг/с.

Нет ли какого-либо способа катализировать, существенно ускорить этот процесс. Как показали канадский физик Вильям Унру и американский физик Роберт Уолд в 1983 г., такой способ существует.

Прежде чем познакомиться с этим способом, сделаем еще несколько замечаний о вакууме. Доказано, что в отсутствие поля тяготения в пустом пространстве (в вакууме) должен наблюдаться следующий эффект. Если

взять детектор каких-либо частиц (например, фотонов) и начать двигать его с ускорением a , то детектор начнет считать частицы, как будто он находится не в вакууме, а, как говорят физики, в тепловой бане. Температура этой бани определяется ускорением и равна

$$T = \hbar a (2\pi k c)^{-1} = (10^{-42} \text{K}) \left(a \frac{\text{см}}{\text{с}^2} \right),$$

здесь k — постоянная Больцмана. При достижимых в лабораториях ускорениях, разумеется, эта температура ничтожна. Но принципиально важно, что ускоренный детектор регистрирует виртуальные вакуумные частицы как реальные! То, что наблюдатель, не испытывающий ускорения, считает вакуумом, вовсе не вакуум в обычном смысле слова для ускоренного наблюдателя.

Вернемся к черной дыре, находящейся в вакууме. Наблюдатель, покоящийся вблизи ее горизонта, испытывает, как мы знаем, огромное ускорение $a_g = GM/r^2 \sqrt{1 - r_g/r}$. Поэтому он, образно говоря, будет находиться как бы в «бане» теплового излучения. Несколькими упрощенно можно сказать, что здесь имеется много квантов теплового излучения.

Как мы уже говорили выше, те из этих квантов, которые движутся почти точно по радиусу, уходят вдаль от черной дыры. Это и есть квантовое испарение. Траектории остальных квантов столь сильно искривляются, что они не могут уйти в пространство. Таким образом, мы здесь с несколько иной точки зрения описали картину возникновения процесса Хоукинга, представленную в предыдущих разделах. Еще раз напомним, что вблизи черной дыры очень трудно четко определить, что такое реально возникший квант, пока он не улетел достаточно далеко.

Уместно провести следующую аналогию с генерацией электромагнитных волн в классической, неквантовой физике. Если мы находимся вблизи генератора на расстоянии меньше длины испускаемой волны, то в этой области переменное электромагнитное поле еще не есть волна, оно еще не оторвалось от излучателя и не распространяется свободно в пространстве со скоростью света. Электрическое и магнитное поля здесь еще не связаны характерными соотношениями, присущими волне. Это еще волна в процессе рождения. Только уйдя подальше от излучателя, мы обнаруживаем истинные элек-

тромагнитные волны. Так и о квантах вблизи черной дыры можно выразиться, что они, так сказать, еще не совсем рождены.

Читатель, наверное, заметил, что согласно нашему описанию медленность квантового испарения черных дыр связана с очень сильным полем тяготения. Если квант летит не точно по радиусу наружу, то тяготение быстро искривляет его траекторию, заставляя вновь падать к черной дыре. Квантов вблизи горизонта много, но только ничтожная их часть, летящая по радиусу, ускользает от черной дыры. Как говорят, кванты находятся за потенциальным барьером, мешающим их быстрому разлету.

Возникает вопрос, нельзя ли попытаться как-то вытащить кванты из-под этого барьера и извлечь, таким образом, связанную с ними энергию. Оказывается, это сделать можно.

Как показали Унру и Уолд, если мы опустим к горизонту событий черной дыры ящик с зеркальными стенками и с открытой крышкой подержим там некоторое время, чтобы он наполнился квантами, затем закроем крышку и вытащим ящик назад на нашу искусственную сферу вдали от черной дыры, то он окажется наполнен

излучением с температурой $T = T_{\text{ч.д.}} \left(\frac{d}{r_g} \right)^{-1/4}$, где d —

расстояние от горизонта до уровня, куда мы опускали ящик. Если мы опускали ящик вплотную к черной дыре, то d будет много меньше r_g и температура «вытащенного» излучения огромна. И это излучение, естественно, содержит большое количество энергии. С помощью ящика мы протащили излучение сквозь потенциальный барьер. Правда, при подъеме ящика от черной дыры затрачивалась энергия. Но энергия, содержащаяся в поднятом ящике, с лихвой компенсирует эти затраты. Если сделать ящик малой высоты d и больших поперечных размеров порядка размеров самой черной дыры r_g , то за одно «черпание» с помощью такого «ковша» чистый выигрыш энергии оказывается равным $E \approx (\hbar c r_g)/d^2$.

При использовании примитивной технологии ковша, только что описанной нами, и в случае использования черных дыр звездной массы, а d , скажем, в 1 см, получаемая энергия оказывается незначительной при одном

черпани. Но можно существенно улучшать технологию. Помимо уменьшения толщины ящика-ковша d , можно еще построить непрерывную ленту с такими ковшами, нечто подобное роторному экскаватору, когда ковши один за другим в быстром темпе будут подходить к черной дыре, черпать энергию и уносить ее прочь. Расчет показывает, что при этом темп исчерпания энергии определяется соотношением $p \approx 10^{-7} \text{ эрг/с } (d \text{ см})^{-2}$. Эта мощность не зависит от массы черной дыры и определяется только толщиной ящика d .

Законы физики не запрещают в принципе делать d очень маленьким и тем самым повышать эффективность вычерпывания энергии из черной дыры.

Разумеется, для осуществления такой предельной машины пришлось бы преодолеть большое количество различных трудностей. Но наша цель была показать принципиальную возможность подобного источника энергии.

Как ни заманчиво выглядит такой «роторный экскаватор» для черных дыр, несравненно проще получать их квантовую энергию даром. Для этого, как мы знаем, надо найти в природе черную дыру достаточно малой массы. Тогда ее мощность квантового испарения будет велика без всяких добавочных приспособлений.

В следующем разделе будет показано, что черные дыры малых масс (много меньше, чем массы звезд), вероятно, существуют в природе.

ЧЕРНЫЕ МИНИ-ДЫРЫ

Почему черные дыры малой массы не образуются в сегодняшней Вселенной и их очень трудно изготовить, даже в принципе, в лаборатории? Дело в том, что для этого необходимо сжать вещество до очень большой плотности. Чтобы превратить Солнце в черную дыру, его вещество необходимо сжать до ядерной плотности, а для превращения Земли в черную дыру потребуются сжать ее вещество до плотности, еще в сто миллиардов раз большей. Для столь чудовищного сжатия требуются огромные силы. В звездах большой массы эти силы обеспечивает их гравитация. В случае же малых масс гравитации явно недостаточно, и требуются большие силы внешнего давления. Ни в природе, ни в современных лабораториях таких больших сил нет.

Но если мы обратимся к прошлой истории Вселенной, то легко заметим, что в самом начале ее расширения, около 15 млрд. лет назад, были условия, благоприятные для возникновения маленьких черных дыр. Действительно, тогда все вещество находилось в состоянии огромной плотности и никакого дополнительного сжатия не требовалось. Правда, это вещество расширялось с громадной скоростью. Поэтому для того, чтобы в раннюю эпоху жизни Вселенной началось формирование черной дыры, необходимо, чтобы в силу каких-то случайных причин в небольшом объеме либо скорость расширения вещества была меньше скорости окружения, либо вещества было несколько больше, чем в таких же соседних объемах. Тогда силы тяготения смогут затормозить расширение в этом объеме и через некоторое время обратить его в сжатие. Возникнет маленькая черная дыра. На такую возможность в 1966 г. указали Я. Б. Зельдович и автор брошюры, а в 1971 г. С. Хоукинг.

Итак, во Вселенной на раннем этапе могут возникать маленькие черные дыры, причем их массы могут быть намного меньше масс звезд. Что с ними будет в дальнейшем? Их судьба зависит от массы.

Малые черные дыры излучают квантовым образом. Как показывают расчеты, к нашему времени успеют полностью «испариться» все черные дыры с массой меньше 10^{15} г. Более тяжелые дыры доживут до наших дней. Могут ли они быть обнаружены астрономическими методами, если действительно существуют во Вселенной? Самым действенным способом их обнаружения являются попытки детектировать создаваемое ими квантовое излучение. Как мы уже знаем, черные дыры с массой 10^{15} г, имея размер, равный размеру атомного ядра, испускают кванты с энергией порядка 100 МэВ. Наблюдение таких квантов, приходящих из космоса, могло бы помочь обнаружить первичные черные дыры. Пока же они не обнаружены, и можно только сказать, что количество черных дыр с массой около 10^{15} г во Вселенной должно быть в среднем не больше тысячи на каждый кубический световой год. Если бы их было больше, то общее их излучение было бы заметно. Число «тысяча», конечно, внушительно, но вспомним, что масса их ничтожна по сравнению с массой звезд.

Только будущие наблюдения покажут, существуют ли черные мини-дыры во Вселенной.

ТРАНСПОРТИРОВКА ЧЕРНЫХ ДЫР

Из нашего предыдущего рассказа ясно, что в природе, вероятно, есть массивные черные дыры звездного происхождения, сверхмассивные черные дыры в центрах галактик и, возможно также, черные мини-дыры ранней Вселенной. В будущем все эти черные дыры могут использоваться как источник энергии.

Принципы использования черных дыр могут быть разными. Например, можно представить себе достаточное число черных мини-дыр на орбитах вокруг Земли. Они будут излучать квантовым образом. Если масса каждой черной дыры 10^{15} г, то каждая из них излучает 10^{10} Вт ($= 10^{17}$ эрг/с). Но как вывести черную дыру на орбиту вокруг Земли? Как вообще транспортировать черные дыры? Это ведь не обыкновенное тело. У черной дыры нет материальной поверхности. Ее нельзя зацепить канатом и отбуксировать в нужное место. К черной дыре не приделаешь реактивный двигатель, чтобы с его помощью перемещать черную дыру. Наконец, черную дыру не заключишь в какой-нибудь контейнер. Действительно, вспомним, что при массе, равной массе горы, размер ее 10^{-13} см. Она будет свободно проходить через любые преграды, свободно будет прошивать насквозь даже земной шар.

Как же можно все-таки заставить черную дыру двигаться в нужном направлении, увеличивать и уменьшать скорость этого движения по нашему желанию? Чем можно воздействовать на черную дыру?

Прежде всего, конечно, это поле тяготения. Черная дыра подвластна действию тяготения точно так же, как и любой вид физической материи. Она падает в этом поле с тем же ускорением свободного падения, что и любые другие тела. Тяготение искривляет ее траекторию движения. Ясно поэтому, что простейший способ заставить черную дыру начать двигаться в нужном направлении — это использование поля тяготения.

Можно поступить, например, следующим способом (рис. 13). Подведем к черной дыре достаточно массивное тело, скажем, астероид с массой, большей массы черной дыры. Сделать это можно с помощью установленных на нем реактивных двигателей. Черная дыра начнет падать в поле тяготения астероида в направлении к его центру масс. Подождем некоторое время, по-

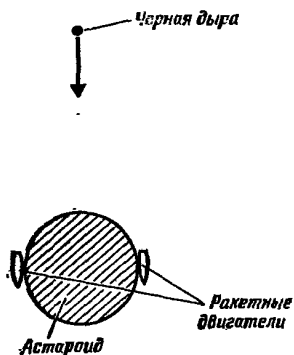


Рис. 13. Черная дыра ускоряется тяготением астероида

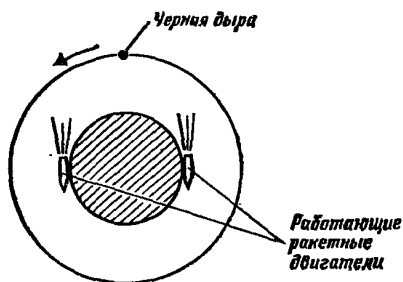


Рис. 14. Черная дыра на орбите вокруг астероида

ка черная дыра приобретет достаточную скорость движения в направлении астероида, после чего астероид можно увести подальше в пространство, а черная дыра продолжит свой полет по инерции с приобретенной скоростью. Конечно, при сравнительно скромной массе и реальных размерах астероида сообщаемое его полем ускорение будет невелико. Невелика может быть и приобретенная черной дырой скорость. Максимальное ее значение равно второй космической скорости на поверхности астероида. Так, астероид размером в 100 раз меньше Земли может разогнать черную дыру до скорости около 10^4 см/с. Можно, однако, усовершенствовать этот способ. Надо заставить работать двигатели ракет, установленных на астероиде, и придать ему ускорение в сторону, противоположную черной дыре, и такое же по величине, с которым черная дыра падает к астероиду. В этом случае система астероид — черная дыра может хотя и медленно, но неограниченно ускоряться.

Подобным же образом можно тормозить движение черной дыры, подводя астероид к ней с противоположной стороны, а также изменять направление движения. Если черная дыра выведена на орбиту вокруг Земли, то, подводя к ней с той или иной стороны массивные тела, можно корректировать ее орбиту полем тяготения этих тел.

Некоторым изменением предложенного выше спосо-

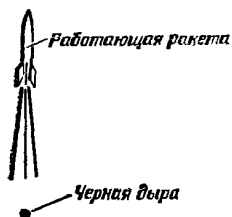


Рис. 15. Черная дыра ускоряется ракетой, выходящей в ее поле тяготения

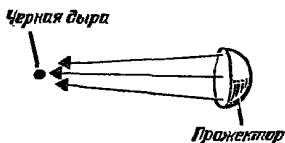


Рис. 16. Ускорение черной дыры направленным пучком излучения

ба транспортировки черных дыр является следующий.

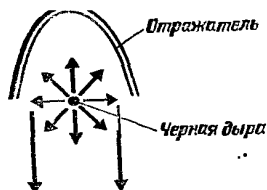
Подведем к черной дыре массивный астероид и так организуем его маневр, чтобы он, подлетев к черной дыре с некоторым прицельным параметром, уменьшил свою скорость и тем самым заставил черную дыру выйти на круговую орбиту вокруг него (рис. 14). После этого астероид можно медленно разгонять с помощью установленных на нем реактивных двигателей. Если разгон достаточно плавный, то черная дыра будет следовать за астероидом, кружа вокруг него по орбите. Для осуществления этого процесса необходимо, чтобы ускорение астероида было заметно меньше ускорения свободного падения к астероиду на орбите черной дыры.

Рассмотренные нами способы требовали использования достаточно массивных тел. Можно ли обойтись без этого?

Оказывается, можно. Один из таких способов показан на рис. 15. Ракета с работающими двигателями удерживается тем самым от падения к черной дыре. Поток выброшенных газов с большой скоростью проходит мимо черной дыры, и лишь очень малая их часть попадает в нее. В результате вся система ракета + черная дыра приобретает импульс в противоположную сторону по сравнению с направлением выброса газов и все больше ускоряется. Чем ближе ракета расположена к черной дыре, тем с большей мощностью должны работать двигатели ракеты, чтобы удержать ее от падения. Значит, тем быстрее будет разгоняться вся система.

На рис. 16 представлен еще один способ придания импульса черной дыре, на сей раз без поля тяготения и действия ракет. Надо облучать черную дыру направлен-

Рис. 17. Использование квантового излучения черной дыры для ее передвижения



ным потоком излучения, так, чтобы это излучение захватывалось черной дырой. Вместе с захваченным излучением черная дыра будет приобретать содержащийся в нем импульс и придет в движение. Образно говоря, черная дыра здесь приходит в движение под действием давления излучения. Не правда ли, удивительная ситуация, когда давление излучения действует на пустоту, точнее, на сгусток тяготения, каким является черная дыра.

Нельзя ли использовать для разгона черной дыры энергию ее собственного квантового излучения? На рис. 17 представлен такой прокет, предложенный советским физиком С. И. Блинниковым.

Суть проекта состоит в следующем. Рассмотрим черную дыру с массой, скажем, в 10^{15} г и излучающую 10^{17} эрг/с. На некотором расстоянии от черной дыры находится отражатель, перехватывающий существенную часть излучения черной дыры и посылающий его параллельным пучком в одну сторону. Масса отражателя подбирается достаточно большой, чтобы сила тяготения черной дыры уравнивала силу давления излучения на отражатель. В этом случае отражатель будет неподвижен относительно черной дыры. Большая часть излучения черной дыры теперь уходит от системы в одну сторону, и сама система черная дыра + отражатель разгоняется в противоположную сторону вследствие реактивной отдачи.

Приведем для примера конкретные числа, которые могут характеризовать эффективность такого метода транспортировки.

Пусть, как уже сказано, мы используем черную дыру с массой 10^{15} г и излучающую 10^{17} эрг/с. Поместим отражатель на расстоянии 1 км от черной дыры. Тогда для равновесия необходимо, чтобы масса отражателя была около 10^8 г, т. е. 100 т. Ускорение, которое приобретает вся система вследствие того, что отражатель на-

правляет поток излучения в одну сторону, равно $3 \cdot 10^{-9}$ см/с². Это, конечно, очень небольшая величина. Но при длительном действии скорость системы может стать заметной. Так, через сто лет после сооружения отражателя система приобретет скорость около 10 см/с.

За миллион лет такая система, непрерывно разгоняясь, пройдет расстояние в световой год. В конце этого движения скорость системы будет около 1 км/с. Перемещение не слишком быстрое, но надо помнить, что мы имеем дело с космическими масштабами и со столь удивительными объектами, как черные дыры. Следует также напомнить, что перемещение это не требует никаких дополнительных затрат энергии. В длительных планах развития человечества можно будет предусмотреть перемещение нужного количества черных дыр в нужное место.

Во всех проектах, схемы которых мы приводили, разумеется, мы не касались вопросов устойчивости движения отдельных частей системы, вопросов стабилизации движения и т. д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наука о черных дырах еще очень молода. Она насчитывает всего несколько десятилетий. В популярной литературе обычно отмечается, что еще в конце XVIII в. англичанин Дж. Митчел и француз П. Лаплас предсказали возможность существования черных дыр. Если быть точным, то следовало бы сказать, что эти ученые предсказали лишь одно свойство, присущее черным дырам — то, что они не выпускают свет. В рамках теории тяготения Ньютона они и не могли сделать большего, не могли предсказать удивительные свойства черной дыры как своеобразного объекта, подлинной дыры в пространстве и времени.

Только в 30-х годах нашего столетия, после создания Эйнштейном современной теории тяготения, американские теоретики Р. Оппенгеймер и Х. Снайдер дали точное теоретическое описание черной дыры. Прошло еще четверть века, пока физики разобрались в основных особенностях этого объекта, не имевшего аналогов в предыдущей истории физики. И вот на протяжении последних двадцати пяти лет физики с неослабевающим интересом открывают и изучают все новые и новые свойства

ва черных дыр. От былой наивной картины объекта, в который все только падает и ничто не выходит, не осталось и следа. Сегодня ясно, что свойства черных дыр многообразны, и нет сомнения, что в будущем развитии физики и, вероятно, техники и технологии черным дырам предстоит сыграть выдающуюся роль. Некоторые модели, представленные в этой книжке, как мы надеемся, дали возможность читателю это почувствовать. Возможно, что иной читатель и спросит: зачем же обращаться к такой экзотике, как черные дыры, если есть во Вселенной даровой источник энергии в виде звезд. В некотором отношении читатель прав. Но напомним, что, во-первых, черные дыры обеспечивают стопроцентное превращение массы вещества в энергию, в то время как звезды могут дать только малые доли процента, во-вторых, сверхмассивные черные дыры, например в квазарах, имея размер меньше солнечной системы, светят в сотни раз мощнее, чем крупные галактики, содержащие сотни миллиардов звезд, в-третьих, энергия, даваемая черными дырами, может быть в самых различных формах в отличие от энергии звезд, наконец, в-четвертых, черные дыры могут служить необычными преобразователями энергии. Мы не говорим здесь и о многих других особенностях черных дыр.

Подводя итог, следует сказать, что наука и (как мы осмеливаемся сказать) техника черных дыр стоят пока лишь в самом начале своего вероятного будущего бурного развития.

ЛИТЕРАТУРА

Киржниц Д. А., Фролов В. П. Черные дыры, термодинамика, информация. — Природа, 1981, № 11, с. 2.

Новиков И. Д. Черные дыры во Вселенной. — М., Знание, 1977.

Фролов В. М. Введение в физику черных дыр. М., Знание, 1983.

Шакура Н. И. Нейтронные звезды и «черные дыры» в двойных системах. М., Знание, 1976.

Гончарский А. В., Черепашук А. М., Ягола А. Г. Некорректные задачи в современной астрофизике. — Природа, 1985, № 9, с. 3.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Поле тяготения вокруг черной дыры	4
Вращающаяся черная дыра	7
Как изготовить черную дыру	11
Простейшая машина	12
Гравитационное излучение	13
Движение тел вокруг черной дыры	15
Излучение энергии падающими телами	17
Аккреция газа черной дырой	19
Энергия вращения черной дыры	22
Черная дыра — генератор излучения	26
Черные дыры и больше ничего...	28
Взаимопревращение электромагнитных и гравитационных волн	30
Электрические свойства поверхности черной дыры	31
Черная дыра как элемент сопротивления в электрической цепи	35
Черная дыра как ротор электрического мотора	37
Вращающаяся черная дыра в магнитном поле	89
Черная дыра как источник тока	41
Сверхмассивные черные дыры в центрах галактик	42
Электрические машины в центрах галактик	42
Черная дыра как тепловая машина и квантовые эффекты	47
Квантовое рождение частиц	48
Квантовый поток энергии из черных дыр	50
Квантовый источник энергии	52
Можно ли быстро «вычерпать» энергию из черной дыры	53
Черные мини-дыры	56
Транспортировка черных дыр	58
Заключение	62
Литература	63

Игорь Дмитриевич Новиков

ЭНЕРГЕТИКА ЧЕРНЫХ ДЫР

Гл. отраслевой редактор Л. А. Ерлыкин. Редактор К. А. Кутузова. Мл. редактор Л. Л. Нестеренко. Обложка художника Г. Ш. Басырова. Худож. редактор М. А. Гусева. Техн. редактор Л. А. Солнцева. Корректор И. В. Сорокина.

ИБ № 7772

Сдано в набор 28.11.85. Подписано к печати 28.01.86. Т 03908. Формат бумаги 84×108¹/₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать, высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,43. Тираж 33 990 экз. Заказ 2644. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 864003.
Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

